



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Hackel Kristóf

**Elosztott energiatermelők hálózati
integrálásának támogatása: kiserőművek
hálózati és szigetüzemi körülmények közötti
vizsgálatára alkalmas hardver/szoftver
környezet létrehozása**

Diplomaterv

KONZULENS

Prikler László

BUDAPEST, 2014



Diplomaterv feladat

Elosztott energiatermelők hálózati integrálásának támogatása: kiserőművek hálózati és szigetüzemi körülmények közötti vizsgálatára alkalmas hardver/szoftver környezet létrehozása

Hackel Kristóf

Villamosmérnök hallgató számára (MSc)

Az elosztott energiatermelők megjelenése a közép feszültségű közcélú hálózaton a zárlatvédelem újrachangolását, esetenként a védelmi koncepció újragondolását igényli. A korszerű mikroprocesszoros védelmek vizsgálata történhet oly módon, hogy a „fizikai” hálózatot egy számítógépi szimulációs környezetben hozzuk létre és a védelem vizsgálatához szükséges feszültség és áramjeleket a védelmi hardverre egy Omicron védelem-vizsgáló berendezés segítségével csatlakoztatjuk.

- 1) Ismertesse, hogy a kiserőművek digitális védelmeiben milyen védelmi funkciókat valósítanak meg a gyártók.
- 2) Mutassa be, hogy az EMTP-ATP/ATPDraw programban milyen eszközök állnak rendelkezésre a védelmi alrendszer működés-szimulációja vizsgálatához.
- 3) Ismerje meg az Omicron vizsgáló berendezés programozási lehetőségét és mutassa be EMTP-ATP programmal való összekapcsolásának lehetőségeit.
- 4) Készítse el egy Nagy/Köf transzformátorállomásból ellátott fogyasztói terület számítógépi szimulációját és az egyes zárlatfajták vizsgálatához szükséges modelleket. A modell vegye figyelembe a kompenzált hálózat jellegzetességeit (maradékáram, felharmonikus jelenléte).
- 5) Néhány alkalmazási példán keresztül mutassa be, hogy a kiserőmű csatlakozási pontján mintavételezett villamos jelek felhasználásával hogyan lehet az egyes védelmi funkciókat tesztelni és a védelem helyes működését dokumentálni.

Konzulens: Prikler László, Villamos Energetika Tanszék

Zárávizsga tárgyak: 1) Hálózati tranziensek
2) Védelmek és automatikák

A diplomaterv készítésének helye: Villamos Energetika Tanszék

Budapest, 2013. október 16.

Dr. Kiss István
egyetemi docens
tanszékvezető

Hallgatói nyilatkozat

Alulírott **Hackel Kristóf**, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a diplomatervet meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Kelt: Budapest, 2014.05.25.

.....

Hackel Kristóf

Összefoglaló

A villamosenergia-rendszert, illetve annak helyes működését szolgáló védelmi rendszereket a hagyományosan centralizált, nagyteljesítményű betáplálásokat alapul véve tervezték és építették. A decentralizált energiatermelők megjelenésének és tömeges elterjedésének köszönhetően az eredetileg egyirányú teljesítményáramlás már nem minden esetben igaz, a jellemzően kis- és középfeszültségre tápláló elosztott energiatermelők teljesítményüktől függően visszatáplálhatnak a nagyfeszültségű hálózat irányába. E kétirányú teljesítményáramlás a védelmi készülékek működését megzavarhatja, és zárlat kialakulása esetén a védelmi berendezések működésének elmaradása veszélyeztetheti a villamosenergia-rendszer üzembiztonságát.

További probléma, hogy az elosztottan termelő kiserőművek a szinkron járó villamosenergia-hálózatról történő leválás esetén szigetbe kerülhetnek a hálózatrész egyéb fogyasztóival együtt. A szigetüzemi körülmények közötti működésre jelenleg még nincs kialakult nemzetközi gyakorlat, a legtöbb országban tiltott, és a kiserőműnek automatikusan le kell kapcsolódnia a hálózatról. A kiserőmű védelmi rendszerének fel kell tudnia ismerni a megváltozott üzemállapotot és kioldási parancsot kell adnia.

A fenti jelenségek miatt a kiserőművek csatlakozásának hatásait vizsgálni szükséges, amelynek egyik lehetséges módja a villamosenergia-rendszer, valamint a védelmi berendezések modellezése és segítségükkel megfelelő szimulációk futtatása. Dolgozatom során az *EMTP-ATP* szimulációs környezetet használok.

A problémakör vizsgálatához először ismertetem a gyártók által megvalósított szigetüzem érzékelésére kifejlesztett védelmi funkciókat, majd bemutatom az *EMTP-ATP* szimulációs programot. Ezután előállítok egy olyan középfeszültségű, szabadvezetékes, kompenzált hálózatot, amely alkalmas a kiserőművek telepítésének védelmi berendezésekre gyakorolt hatásainak elemzésére. Ezt követően elkészítem az egyes szigetüzem érzékelési védelmi funkciók *ATPDraw*-beli modelljeit, és a középfeszültségű hálózati modelletem felhasználva ellenőrzöm helyes működésüket. Végül kitérek a valós védelmi berendezések *Omicron CMC356*-os tesztberendezés segítségével történő vizsgálatának lehetőségeire.

Abstract

Power distribution systems and protection devices have traditionally been designed and built assuming a centralized power supply with high performance generation units. Due to the appearance and penetration of distributed generation (DG) the originally one-way power flow is not true anymore in all cases: depending on the capacity of DG units the direction of power flow may turn. This bidirectional power flow can disrupt the operation of protection devices. In a faulty situation, it can possibly cause the failure of necessary operation.

A further issue is that islanded operation can occur when the distributed generation system with some loads is disconnected from the utility power system. There is no internationally accepted practice yet that describes how these DG units should work in islanded operation. It is forbidden in the most countries and the distributed generators must automatically disconnect themselves from the network under these circumstances. The protection system of small-scale generators must be able to detect the changed operating conditions and must give a tripping command.

The examination of the effects of the grid-connected distributed generation units are essential because of the reasons mentioned above. One possible way of this examination is the modelling of the electric network and the relay systems, and running computer simulations. In this thesis the *EMTP-ATP* simulation environment was used for this purpose.

In order to give a short review of the problem I present the solutions of different manufacturers to detect islanded operation and I present the program package *EMTP-ATP*. After that I build a medium voltage compensated network that is suitable for the investigation of the effects of the distributed generators on the protection systems. Then I build the models of the different islanding detection schemes in *ATPDraw* and I confirm their proper operation using the medium voltage network model mentioned above. Finally, I briefly describe the possibilities of testing real protection devices with the *Omicron CMC356* testing device.

Tartalomjegyzék

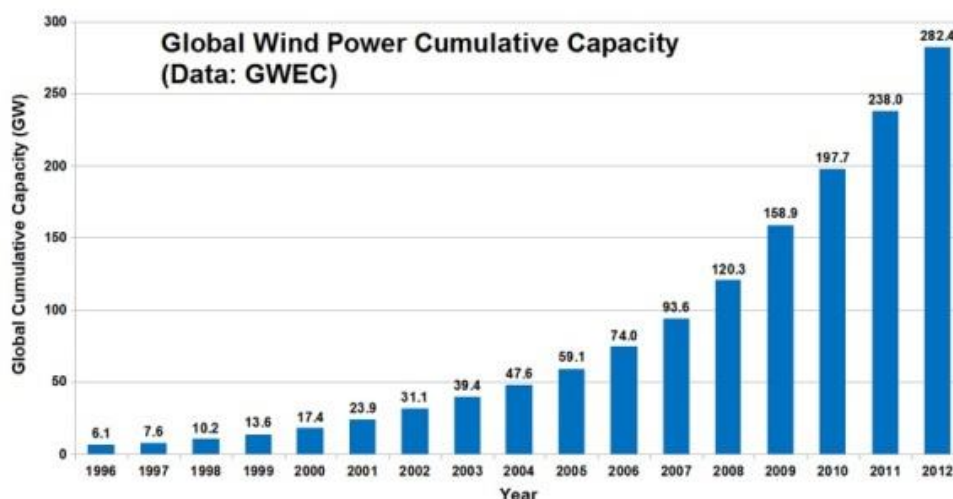
Hallgatói nyilatkozat	ii
Összefoglaló	iii
Abstract	iv
Tartalomjegyzék	v
1 Bevezetés.....	8
1.1 Szigetüzem.....	9
1.2 Szélerőmű típusok	10
1.3 Feladat összefoglalása	12
2 Szigetüzem elleni védelmek	13
2.1 Passzív védelmi módszerek	13
2.1.1 Feszültségmérésen alapuló funkciók.....	13
2.1.2 Frekvenciamérésen alapuló védelmi funkciók	14
2.2 Aktív védelmi módszerek	17
2.2.1 Áram-injektáláson alapuló érzékelési módszer	17
2.2.2 Aktív Frekvencia Eltolás Pozitív Visszacsatolással (Active Frequency Drift with Positive Feedback- <i>AFDPF</i>).....	18
3 EMTP- Electromagnetic Transient Program	21
3.1 EMTP-ATP (Alternative Transients Program)	21
3.2 Program felépítése	22
3.2.1 Szimulációt végző egység	22
3.2.2 Szimulációt támogató egységek	25
3.3 ATPDraw	26
3.4 ATPDraw elemkészlete.....	26
3.4.1 Vezeték és transzformátor modellek	27
3.4.2 Egyéb elemek	29
3.4.3 Power Systems Toolbox	30

4	Kiserőművek védelmi berendezésekre gyakorolt hatásainak vizsgálatára alkalmas szoftver környezet létrehozása	33
4.1	Modell bemutatása	33
4.1.1	Általános leírás, egyszerűsített egyfázisú hálózatkép	33
4.1.2	Mögöttes hálózat leképezése	34
4.1.3	Középfeszültségű hálózat kompenzálása	35
4.1.4	Fogyasztók	37
4.1.5	Transzformátorok, távvezetékek, leágazások	38
4.1.6	Kompenzálás hatásának bemutatása	40
4.2	Középfeszültségű hálózat védelmei	42
4.2.1	Védelmi funkciók és felépítés	42
4.2.2	Túláramvédelem beállításszámítása	44
4.2.3	Földzárlatos vonal kiválasztása: zérus sorrendű áramérzékelés	46
4.2.4	Megszakító	47
4.2.5	Működés bemutatása, szimuláció	48
4.3	Kiserőmű csatlakozásának védelmi működésekre való hatásának vizsgálata	52
4.3.1	Vizsgálat előtti megfontolások	52
4.3.2	1. Szenárió: Hibás tartalékvédelmi, helyes alapvédelmi működés	54
4.3.3	2. Szenárió: Helyes tartalékvédelmi, hibás alapvédelmi (késleltetett fokozat) működés	56
4.3.4	3. Szenárió: Hibás tartalékvédelmi és hibás alapvédelmi (késleltetett fokozat) működés	58
4.3.5	4. Szenárió: Helyes tartalékvédelmi, hibás alapvédelmi (gyorsfokozat) működés	60
4.3.6	5. Szenárió: Helyes védelmi működések: zárlat a mögöttes hálózat és a kiserőmű között ...	62
4.3.7	További vizsgálati lehetőségek	64
5	Szigetüzem elleni védelmek ATPDraw-ban történő megvalósítása	65
5.1	Feszültségmérésen alapuló szigetüzem érzékelési funkciók	66
5.2	Frekvenciámérésen alapuló szigetüzem érzékelési funkciók	67
5.3	A szigetüzem elleni védelmek működésének bemutatása	69
6	Kiserőművek szigetüzemének felismerésére alkalmas hardver környezet létrehozása	79

6.1	Védelmi készülékek tesztelése	79
6.2	Modern tesztberendezések felépítése	80
6.3	Omicron CMC356	81
6.4	CM Engine	83
6.5	TransPlay	85
7	Összegzés.....	90
	Köszönetnyilvánítás.....	91
	Irodalomjegyzék	92
	Digitális mellékletek	1

1 Bevezetés

A megújuló energiaforrásokban rejlő lehetőségek felismerésének, a technológia (félvezető technológia, teljesítményelektronika, energiatárolás, stb.) fejlődésének, a villamosenergia-piac liberalizációjának, az EU-s irányelveknek, valamint a megújulókra vonatkozó állami támogatásoknak köszönhetően a közelmúltban Európa- és világszerte jelentős mennyiségű és kapacitású megújuló energiaforrással termelő kiserőmű került kiépítésre. Ezen termelők közös jellemzője, hogy jelentős részben kis- és közép feszültségre táplálnak be, névleges teljesítményük a hagyományos energiaforrást hasznosító erőműveknél alacsonyabb, illetve a villamosenergia-rendszerben nem koncentráltan, hanem elosztottan vannak jelen. Emiatt szokás ezeket elosztott energiatermelőknek is nevezni. Amennyiben egy termelő névleges teljesítménye 50 kVA alatti, akkor háztartási méretű kiserőműnek, amennyiben 50 kVA és 50 MVA közötti a kapacitása, akkor kiserőműnek nevezik. Az elosztott villamosenergia-termelésben nem csak ezen megújuló energiaforrásokat használó erőművek (naperőmű, szél erőmű, biogáz, biomassza, stb.) vesznek részt, hanem egyéb alacsonyabb névleges teljesítményű, nem nagyfeszültségre betápláló termelők is, mint például a kombinált ciklusú kiserőművek, vagy egyéb szinkrongenerátorok. Azonban a trendek elsősorban a szél- és naperőművek további penetrációját jelzik előre. A háztartási méretű kiserőművek között már jelenleg is meghatározó részarányt képviselnek a megújulók a háztartások saját energiagazdálkodásuk racionalizálása miatt.



1-1. ábra Szél erőművek penetrációja [1]

Az elosztott villamosenergia-termelés történelme igen távolra nyúlik vissza az időben, hiszen a kezdeti egyenáramú villamosenergia-rendszerre jellemző volt, hogy az egyes termelőket szükséges volt közel építeni a fogyasztókhoz az átvitel során keletkező nagy veszteségek miatt (az alacsony feszültség szint eredményeként). Azonban a váltakozó feszültségű termelés, átvitel és elosztás térnyerése következtében a nagyfeszültségre koncentráltan történő betáplálás vált világszerte elterjedté. Ebből adódóan az energiaáramlás eredendően a nagyfeszültségű oldal felől a kisebb feszültség szintek irányába valósult meg. Ennek megfelelően a mai villamosenergia-rendszer, valamint annak helyes működését szolgáló védelmi rendszerek tervezése és építése is e hagyományosan koncentrált, nagyteljesítményű betáplálásokat alapul véve történt.

Azonban az elosztott energiatermelők megjelenése következtében ez már nem teljes mértékben igaz. A kétirányú teljesítményáramlások hibás védelmi működéseket okozhatnak nem megfelelő tervezés esetén. Problémát jelenthetnek az olyan aszinkron generátorokkal termelő kiserőművek, amelyek hatásos teljesítmény termelésük mellett meddő energiát igényelnek, ezek pótlásáról külön gondoskodni kell. Hálózati hiba esetén ezen elosztott energiatermelők rátáplálást jelentenek a kialakult zárlatra, amely új védelmi módszerek alkalmazását teszi szükségessé. Az elosztott energiatermelők szigetüzemi körülmények közötti működésére jelenleg még nincs kialakult nemzetközi gyakorlat. A legtöbb országban a szigetüzem tiltott és a kiserőműnek automatikusan le kell kapcsolódnia a hálózatról ilyen esetben. A nagy megújuló penetrációval rendelkező energiarendszerekben külön szabályozások vonatkoznak a termelők zárlat alatti és szigetüzem esetén szükséges magatartására.

1.1 Szigetüzem

Szigetüzemi működésnek nevezik azt az üzemállapotot, amikor a hálózat egy összefüggő területe leválik az együttműködő villamosenergia-hálózatról, és ezen levált hálózaton fogyasztók, illetve energiatermelők is jelen vannak. Amennyiben a megtermelt energia egyenlő a fogyasztással, úgy elméletileg fenntartható a szigetüzemi működés, ha a feszültség szint és a frekvencia tartásáról a szigetben maradt erőművek szabályozói gondoskodni tudnak. Ez az állapot az üzem folytonossága szempontjából a fogyasztóknak is előnyös lenne. Azonban a jelenlegi szabályozások szerint szigetüzem kialakulása esetén életvédelmi okok miatt, továbbá azért, hogy zárlat esetén a kiserőmű ne táplálja a zárlati áramot, a termelőnek kötelezően le kell válnia a hálózatról. Ez azért is fontos, mert a szinkron járó hálózatról történő leválást követően a külső hálózat és a sziget frekvenciája nem lesz teljesen azonos [2]. A két hálózatrész közötti szögelfordulás a szigetben

termelt és fogyasztott villamos teljesítmény eltérése alapján az (1) képletnek megfelelően becsülhető:

$$\Delta\varphi = 900 \frac{\Delta P}{P_n} t^2 \quad (1)$$

ahol

ΔP a szigetüzem villamosenergia-fogyasztásának és termelésének különbsége,

P_n a kiserőművek névleges teljesítménye,

t a visszakapcsoló automatika holtideje.

A visszakapcsoló automatika a múltó íves zárlatok elhárítása miatt 0.4...1s holtidővel megkísérel visszakapcsolni, vagyis a levált hálózatrészt visszakapcsolni a villamosenergia-rendszerre. Minimális ΔP esetén is a holtidő alatt akkora szögelfordulás jön létre, hogy a két hálózatrész kiesik a szinkronból, az aszinkron állapotban történő visszakapcsolás pedig végzetes lehet a kiserőművek egyes berendezéseinek és az egyes fogyasztói készülékek számára is, illetve a hálózat normális üzemét is veszélyeztetheti.

Ezen okok miatt kiemelten fontos, hogy a kiserőmű idejében felismerje a szigetüzem létrejöttét és lekapcsolódjon a hálózatról. A hiba elmúltával a levált hálózatrész az automatikák segítségével visszakapcsolódhat a mögöttes hálózathoz, majd a szinkronozást követően a kiserőmű is visszacsatlakozhat a normál üzemállapotnak megfelelően.

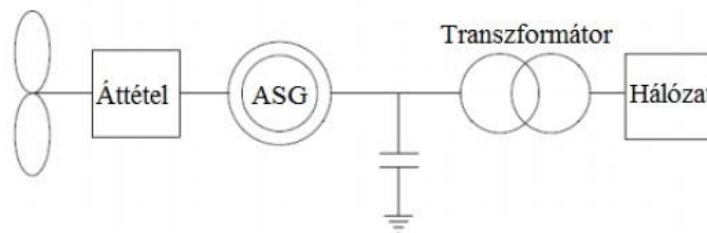
1.2 Szélerőmű típusok

A megújuló energiaforrást használó elosztott energiatermelők egyik legelterjedtebb fajtái a szélerőművek, illetve szélparkok, amelyek akár több tíz MW teljesítményt táplálhatnak a hálózatba, emiatt a szélerőművek főbb típusait és fontos jellemzőit röviden ismertetem. Fontos megjegyezni, hogy a napelemekkel szemben egyes típusai forgó tömeggel is rendelkeznek, amely miatt megfelelő kialakítás mellett akár a villamosenergia-rendszer primer szabályozásában is részt vehetnének, azonban jelen gyakorlat szerint e tulajdonságukban rejlő lehetőség nincsen kihasználva.

A legelterjedtebb szélerőmű típusok:

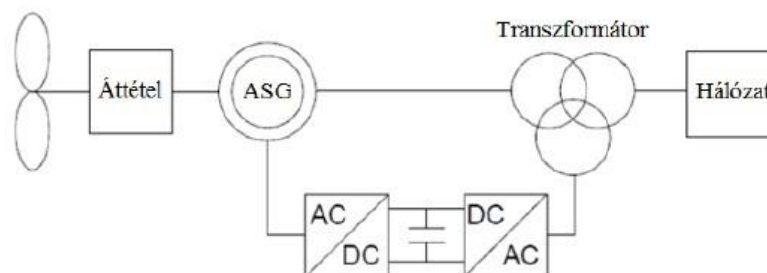
- kalickás forgórészű aszinkron generátor
- kétoldalról táplált aszinkron generátor
- áttétel nélküli szinkron generátor

A kalickás forgórészű aszinkron generátor a szélturbinák régebbi típusához tartozik. Működésének lényege, hogy a turbina az aszinkron generátor forgórészét változtatható áttételeken keresztül mindig állandó szögsebességen tartja, ezzel biztosítva az állórészen indukálódott hálózati frekvenciát. Előnye, hogy viszonylag egyszerű felépítésű és olcsó. Hátránya viszont, hogy a mechanikai sebességváltó karbantartásigényes, az aszinkron generátor hatásfoka nem éri el a szinkron generátorok hatásfokát, illetve működése során meddőenergiát igényel és ennek biztosításához kondenzátortelep telepítése szükséges, hogy ne a hálózatnak kelljen ezt biztosítani. A kalickás forgórészű aszinkron generátor látható az 1-2. ábraán.



1-2. ábra: Kalickás forgórészű aszinkron generátor [3]

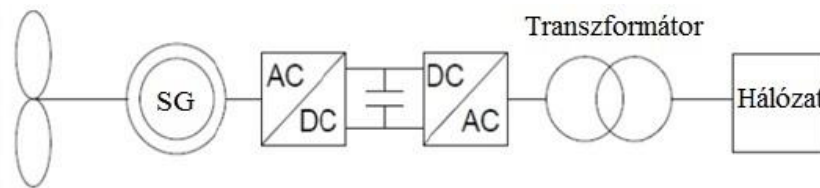
A kétoldalról táplált aszinkron generátor a kalickás forgórészű aszinkron generátornál fejlettebb és némileg bonyolultabb megoldás. Működésének lényege hasonló, azzal a különbséggel, hogy az aszinkron generátor állórészére váltakozó feszültséget kapcsolnak a csatlakozó transzformátor tercier oldaláról egy AC/DC - DC/AC frekvenciaváltón keresztül. Ennek előnye, hogy nem igényel meddőenergiát és harmonikus kompenzációt, hátránya viszont, hogy a generátor névleges teljesítményének 30-40%-ának megfelelő nagyságú teljesítményelektronika szükséges, amely emeli a beruházás költségeit.



1-3. ábra: Kétoldalról táplált aszinkron generátor [3]

Az áttétel nélküli szinkron generátor (általában állandó mágnessel valósítják meg a forgórészt) a szélerősségtől függő frekvenciájú váltakozó feszültséget állít elő, amely a legritkább esetben egyezik meg az 50Hz-es hálózati frekvenciával. Emiatt frekvenciaváltás szükséges, amihez

teljesítményelektronika kell. Ez a megoldás a teljesítményelektronika méretezése miatt (amely a szinkron generátor névleges teljesítményével egyenlő) drága.



1-4. ábra: Áttétel nélküli szinkron generátor [3]

1.3 Feladat összefoglalása

Dolgozatomban az elosztottan termelő kiserőművek és a villamosenergia-hálózat egymásra való hatását vizsgálom. Ez alatt egyrészt azt értem, hogy a kiserőművek telepítése milyen hatást gyakorol a hálózat középfeszültségű oldalára és annak túláramvédelmi berendezéseire, másrészt pedig azt, hogy a kiserőművek csatlakozási pontján mért villamos paraméterek megváltozásából miként állapítható meg, hogy a mögöttes hálózat leválásával szigetüzem jött létre.

Először a későbbiekben modellezésre kerülő szigetüzem érzékelési módszereket ismertetem, azokat, amelyeket a gyártók is megvalósítanak védelmi készülékeikben, továbbá kitérek az aktív védelmi módszerekre is. A vizsgálatokat az *EMTP-ATP* szimulációs környezetben fogom végezni, így ezt követően bemutatom az *EMTP-ATP* programot. A segítségével felépíték egy szabadvezetékes középfeszültségű hálózatrészt, előállítom a szükséges védelmi modelleket és elvégzem azok beállítás számításait. Az így létrehozott középfeszültségű hálózati modell segítségével tesztelem a kiserőművek védelmekre gyakorolt hatását. Ezt követően az ismertetett szigetüzem elleni védelmi funkciókat modellezem és bemutatom a működésüket a már említett hálózati modellen. Végül, de nem utolsó sorban a szoftveres vizsgálatok felől a hardveres tesztelések felé közeledve ismertetem az *Omicron CMC356* típusú relévizsgáló berendezést és felhasználási lehetőségeit.

2 Szigetüzem elleni védelmek

A szigetüzem létrejöttét érzékelő védelmi módszereket két főbb csoportba lehet sorolni: passzív és aktív védelmi módszerekre. Az előbbi az elosztott energiatermelő csatlakozási pontján mért feszültség, frekvencia és fázis adatokból állapítja meg, hogy létrejött-e a szigetüzem. Az utóbbi a hálózatra aktív ráhatással van: valamilyen szándékolt zavart hoz létre benne (például adott frekvenciájú áram injektálásával). E módszer az alapján határozza meg a mögöttes hálózat kapcsolódását, hogy a keltett zavar milyen mértékű változást okoz a rendszerben. [4]

Érdemes megjegyezni, hogy az európai gyakorlatban elsődlegesen passzív védelmi módszereket valósítanak meg a gyártók digitális készülékeikben, azonban a Távol-Keleten a jelentős mennyiségű inverter megjelenése okán a gyakorlatban is alkalmazzák az aktív módszereket. A teljesség kedvéért és a jövőbeli lehetőségek ábrázolásaként röviden az aktív védelmi módszerekről is írok.

A passzív védelmi módszerek ismertetésénél az egyes funkciókat a *Protecta EuroProt* készülékcsaládjának *DSZIV* szigetüzem elleni védelmének [5] dokumentációja alapján mutatom be.

Továbbá megjegyzendő, hogy az alább felsorolásra kerülő szigetüzem elleni védelmi módszereken kívül az egyes gyártók gyakran túláramvédelmi funkcióval is kiegészítik a kiserőmű védelmi rendszerét. Áttekintésre került a *Protecta DSZIV* (és *DSZIV-I*) védelme [5], a *Woodward MRG3* védelme[11], a *Siemens SIPROTEC* termékcsaládja [6] és az *Eaton MRU4*-es védelmi készüléke [7], amelyekben azonos védelmi funkciókat alkalmaznak a szigetüzem érzékelésére.

2.1 Passzív védelmi módszerek

2.1.1 Feszültségmérésen alapuló funkciók

2.1.1.1 Pozitív sorrendű feszültség növekedési és csökkenési védelem

A villamosenergia-hálózat normál üzemállapotában a meddőteljesítmény-egyensúly a névleges feszültség közelében kerül kialakításra. Amennyiben egy hálózatrész szigetüzembe kerül, úgy az esetek többségében a termelt és fogyasztott meddőenergia egyensúly felbomlik, emiatt a feszültség változásnak indul. Ha a levált hálózatrészen meddőteljesítmény többlet áll elő, akkor a feszültség növekedni, ellenkező esetben csökkenni fog.

A funkció méri az egyes fázisok feszültségének Fourier alapharmonikus értékét, majd ezekből a pozitív sorrendű összetevőt képi. Amennyiben a feszültség e komponense egy előre definiált beállítási értéktől meghatározott irányban (attól függően, hogy feszültség növekedési vagy

csökkenési a védelmi funkció) egy előre megadható mértékben eltér, akkor a védelem kioldási parancsot ad, és a generátor leválik a hálózatról.

2.1.1.2 Negatív és zérus sorrendű feszültség növekedési védelem

E funkció a szigetüzem elleni védelmek segédfunkciója. A szigetüzem felismerésének egyik lehetséges módja a feszültség fázisszögében létrejövő hirtelen változás, vagyis a vektorugrás mérése. Erről részletesebb a frekvenciamérésen alapuló védelmeknél írok. Azonban vektorugrás nem csak szigetüzem kialakulásakor jön létre, hanem a hálózaton kialakuló zárlati események során is. Ebben az esetben a kiserőműnek meghatározott ideig át kell hidalnia a zárlatot, vagyis meghatározott ideig nem szabad leválnia a hálózatról. A vektorugrás védelmi funkció önidővel működik, nem késleltethető, így zárlat esetén a funkciót bénítani szükséges. A negatív sorrendű feszültség növekedési védelem célja az aszimmetrikus zárlatok felismerése, hiszen ilyenkor megemelkedik a negatív sorrendű komponens. Ezt érzékelve a védelem bénítja a vektorugrás védelem működését. Hasonlóan a zérus sorrendű feszültség növekedési védelem a földzárlati jelenségek érzékelését célozza.

2.1.2 Frekvenciamérésen alapuló védelmi funkciók

A pontos frekvenciamérést az egyes gyártók eltérő módon valósítják meg. A Protecta Kft. védelmeiben a három fázis kevert feszültségéből egy négyszöggel kerül előállításra, amelynek pozitív nullátmenetei között méri a processzor a periódusidőt, amiből a frekvencia nagy pontossággal meghatározásra kerül.

A gyakorlatban bevett másik szokás, hogy a védelmi készülékek a hálózati frekvenciát a feszültség pozitív és negatív nullátmenetei között eltelt idő átlagolásával határozzák meg, hogy csökkentsék a harmonikusok által okozott torzítások hatását. Erre szintén megoldást nyújthat az, ha a frekvenciamérést megelőzően a feszültség Fourier alapharmonikus komponensét képzik. [11]

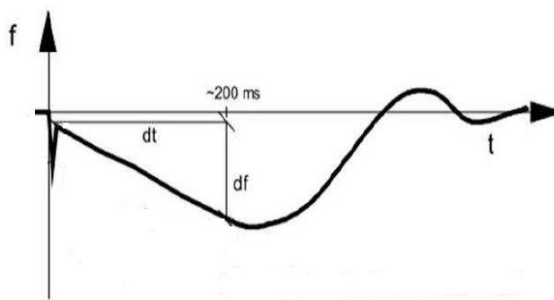
2.1.2.1 Frekvencia növekedési és csökkenési védelem [8][9]

A villamosenergia-hálózat normál üzemállapotában a hatásos teljesítmény egyensúly a névleges frekvencia közelében kerül kialakításra. Ha egy hálózatrész szigetüzembe kerül, akkor valószínű, hogy a generátorok által termelt hatásos teljesítmény nem fog megegyezni a fogyasztással. Amennyiben a fogyasztás nagyobb, vagyis hatásos teljesítmény hiány van, akkor a frekvencia csökkenésnek indul, míg fordítva emelkedni fog. Ha a védelmi készülék által mért frekvencia több egymást követő periódusban átlép egy előre beállított határértéket (természetesen külön

megszólalási érték vonatkozik a frekvenciaemelkedési és csökkenési funkciókhoz), akkor kioldóparancsot ad.

2.1.2.2 Frekvencia változási (frekvencia gradiens) védelem [10]

E frekvenciamérésen alapuló védelmi funkció a frekvencia változási sebessége alapján dönt a kioldásról. Amennyiben terhelésváltozás következik be a szigetüzem létrejötte miatt, akkor a frekvencia közel állandó sebességgel csökkenni vagy emelkedni fog. A változás mértéke arányos a teljesítmény különbözettel. A frekvenciaváltozás sebességét az aktuális és előző pillanatban mért frekvenciából számolja a védelem. Amennyiben ez a változási sebesség több egymást követő periódusban is túllépi a megengedett határértéket, úgy a védelem kioldási parancsot ad. Az általánosságban alkalmazott védelmi beállítás frekvenciaváltozási sebesség esetén nagyságrendileg 0.5 és 2 Hz/s közötti.

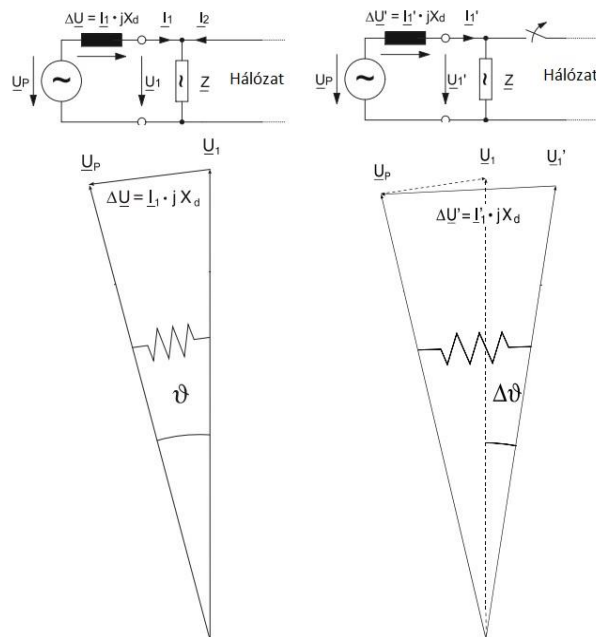


2-1. ábra: Frekvencia csökkenés [11]

2.1.2.3 Vektorugrás védelem [5][11]

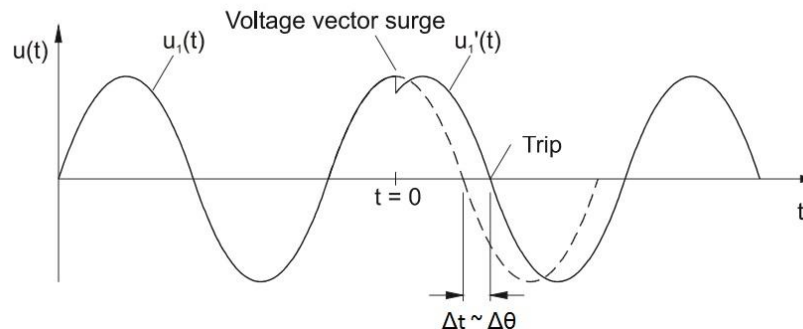
A vektorugrás védelem elsősorban szinkrongenerátorok esetén alkalmazható. A szinkrongenerátor nevéből is adódóan azonos fordulatszámon termel a hálózati frekvenciával, vagyis a forgórész az állórész mezővel együtt, szinkron forog. A teljesítmény leadáshoz szükséges szögeltérés előáll, de fordulatszám eltérés nem lehetséges. A pólusfeszültség és a hálózati feszültség vektora között lévő rotorszög a forgórész által biztosított nyomaték függvénye (2-2. ábra).

Az egyes fogyasztói területeket jellemzően nem egy termelő egység, hanem a hálózat egésze látja el villamos energiával, így hálózati hiba esetén (2-2. ábra) a szigetüzemben maradt generátornak sokkal nagyobb fogyasztási igényt kellene kiszolgálnia. Emiatt a hálózati feszültségvektor hirtelen elfordul a pólusfeszültség fazorához képest, vagyis a rotorszög ugrásszerűen megnő. Innen ered a vektorugrás elnevezés.



2-2. ábra: Rotorszög hibamentes hálózaton (bal) és szigetüzem létrejötté pillanatában (jobb) [11]

Ez a vektorugrás úgy érzékelhető, hogy a hálózati feszültség periódusideje egy periódus erejéig kisebb vagy nagyobb lesz, mint a szomszédos periódusidők (2-3. ábra). Amennyiben a periódusidő meghatározott mértékben eltér a referenciaértéktől, úgy a védelem késleltetés nélkül kioldási parancsot ad.



2-3. ábra: Vektorugrás: periódusidő megváltozása [11]

A vektorugrás védelmi funkció előnye, hogy nagyon gyors az érzékelése, szemben az egyéb feszültség-, illetve frekvenciamérésen alapuló védelmekkel. Míg utóbbiak nagyságrendileg 100-200ms között képesek érzékelni a szigetüzem létrejöttét, úgy a vektorugrás védelem akár már 60ms alatt, így a hálózatrész leválasztása 100-150 ms-on belül megtörténhet.

Előfordulhatnak azonban olyan helyzetek, amikor a vektorugrás védelem használata pótlólagos megfontolásokat igényel. Csúcs- vagy kapcsoltan termelő hőerőművek estén előfordulhat, hogy az

alacsony villamosenergia-árak miatt átmenetileg nem termelnek, ugyanakkor készenlétben állnak, nincsenek leválva a hálózatról és szinkron járnak a hálózati frekvenciával. Ilyenkor a rotorszög nagyon kicsi, minimális teljesítményáramlás történik a szinkrongenerátorból kifelé. Ebben az esetben, ha a generátorhoz közel hálózati hiba lép fel, olyan kismértékű lesz a vektorugrás, hogy a védelem nem ad kioldási parancsot. Amennyiben a generátortól távol történik a hálózati hiba, az nem okoz problémát, hiszen a generátor nagy terhelésnövekedést fog érzékelni, ami még ebben a helyzetben is nagy vektorugrást eredményez.

A passzív védelmi módszerek közös hátránya, hogy előfordulhatnak olyan helyzetek, amikor ezen védelmek nem érzékelik a szigetüzem létrejöttét. Amennyiben egy hálózatrészen a lokálisan betáplált villamos energia közel azonos az adott hálózatrész fogyasztásával, a sziget leválása a hálózatról a fent leírt védelmi módszerekkel nem érzékelhető, ugyanis ebben az esetben a mögöttes hálózat hatásos és meddőteljesítmény táplálásában a szigetüzem létrejötte nem okoz jelentős változást. Erre a problémára nyújthatnak megoldást az aktív védelmi módszerek.

2.2 Aktív védelmi módszerek

Az aktív szigetüzem érzékelési módszerek szemléltetésére két eltérő elven működő megoldást mutatok be, amelyek a [4] cikkben kerültek publikálásra. Érdeemes megjegyezni, hogy ezen aktív módszerek használata elsősorban inverteres táplálások esetén előnyös.

2.2.1 Áram-injektáláson alapuló érzékelési módszer [4]

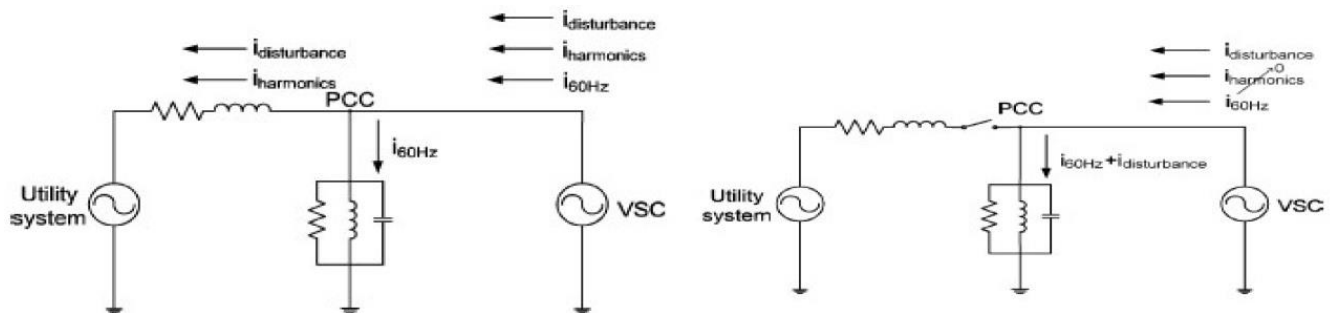
A módszer alapötlete, hogy az elosztott energiatermelő hálózati csatlakozási pontján a hálózat irányába alacsony frekvenciájú és amplitúdójú szinuszos áram kerül beinjektálásra, a védelmi berendezés pedig érzékeli a zavarjel által okozott változást.

Ez kivételesen könnyen megvalósítható inverteres csatlakozások esetén, hiszen megfelelő PWM vezérléssel függetlenül szabályozható az inverter áramának D és Q komponense, ami által az inverter névleges teljesítményéig tetszőleges hatásos és meddő teljesítmény-áramlás előidézhető, így tetszőleges áram-jelalak előállítása lehetséges. Nem inverteren keresztüli csatlakozás esetén pótlólagos eszköz telepítése szükséges a megfelelő áram injektálásához.

Normál, nem szigetüzemi körülmények között a hálózati csatlakozási pont feszültségszintjén a mögöttes hálózat impedanciája lényegesen kisebb, mint a leágazáson lévő egyéb fogyasztóké,

emiatt az injektált zavarjel a hálózat felé elfolyik, így a fogyasztókra hatást nem gyakorol, ahogy az a 2-4. ábra baloldalán követhető.

Szigetüzem létrejöttkor (2-4. ábra) azonban az alacsony impedanciás ág megszűnik, és a zavarjel a fogyasztókon keresztül záródik. A fogyasztón történő feszültségesés miatt a csatlakozási pont feszültségének amplitúdója és frekvenciája is megváltozik, amit a védelmi berendezés érzékelni képes, és így kioldási parancsot ad szigetüzem létrejötte esetén.

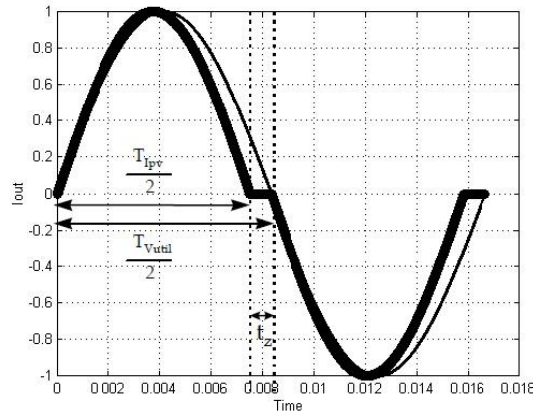


2-4. ábra: Áram-injektáláson alapuló aktív védelmi módszer működése: szigetüzem előtt (bal) és után (jobb) [4]

2.2.2 Aktív Frekvencia Eltolás Pozitív Visszacsatolással (Active Frequency Drift with Positive Feedback- *AFDPF*) [4] [12]

Az elmúlt években igen nagy figyelmet kapott az *AFDPF* aktív szigetüzem érzékelési módszer, amely működésének alapja a pozitív visszacsatolás nélküli *AFD* módszer.

Az inverteren keresztül csatlakozó elosztott energiatermelő kimeneti árama oly módon kerül módosításra, hogy frekvenciája egy félperiódus idejéig nagyobb lesz, mint a hálózati csatlakozási pont feszültségének frekvenciája (innen ered a módszer neve is), azonban az áram következő félperiódusa egészen addig nem indul el, ameddig a feszültség értéke nullátmenetben zérussá nem válik, vagyis adott t_z ideig az inverter árama nulla értéket vesz fel. A leírtak követhetők az alábbi 2-5. ábraán.



2-5. ábra: AFD: áram- és feszültség hullám [12]

A módszer (2) szerint jellemezhető egy c_f állandóval, amely a t_z idő és hálózati csatlakozási pont feszültség fél periódusidejének hányadosa. A megválasztott c_f (ahogy az a későbbiekben látszódni fog) arányos a védelem szigetüzem létrejöttének érzékelési gyorsaságával. Az angol szakirodalomban ezt *chopping fraction*-nek (levágási aránynak) nevezik.

$$c_f = \frac{2t_z}{T_{PCC}} \quad (2)$$

ahol

t_z az inverter áramának 0 értéken eltöltött előre definiált ideje,

T_{PCC} csatlakozási pont feszültségének periódusideje.

Normál üzemi körülmények között az inverter által injektált áram a fogyasztón keresztül folyva nem képes a csatlakozási pont feszültségének frekvenciáját megváltoztatni a mögöttes hálózat robusztussága miatt. Amennyiben a mögöttes hálózat szigetüzem létrejötte miatt leválik, akkor megszűnik a csatlakozási ponton az általa biztosított „frekvencia kényszer”, és az inverter (nagyobb frekvenciájú) áramának megfelelően a feszültség frekvenciája is megnő. A következő periódusban már ehhez az alacsonyabb T_{PCC} periódusidőhöz képest t_z idővel lesz kisebb az inverter áramának periódusideje, vagyis a frekvenciája még tovább nő, ennek következtében a csatlakozási pont feszültségének frekvenciája is. Ez egészen addig ismétlődik, ameddig az említett feszültség frekvenciájának értéke meg nem emelkedik a védelem kioldási szintjének megfelelő értékre.

Minél nagyobb a c_f , annál gyorsabban növekszik a frekvencia a védelem kioldási küszöbéig, vagyis annál gyorsabb lesz a szigetüzem érzékelés ideje. Ugyanakkor nagyobb c_f magasabb THD-t eredményez a hálózaton, így e két kritérium korlátozza értékének megválasztását.

A hagyományos *AFD* módszer a relatív lassú szigetüzem-érzékelése miatt (hiszen a THD értékének alacsony szinten tartása végett kicsi t_z választása szükséges, amely által c_f is igen alacsony lesz) a gyakorlatban nem alkalmazható hatékonyan. Emiatt fejlesztették tovább és alkották meg az *AFDPF*-t, vagyis a pozitív visszacsatolással rendelkező *AFD*-t. Ennek lényege, hogy c_f már nem fixen megválasztott, hanem az a (3) szerint a hálózati csatlakozási ponton mért feszültség- és a mindenkori hálózati feszültség frekvenciájának különbségétől függ:

$$c_f = c_{f0} + K(f_{PCC} - f_{50Hz}) \quad (3)$$

ahol

c_{f0}	a normál üzemben érvényes fixen megválasztott chopping fraction,
K	erősítési faktor,
f_{PCC}	a csatlakozási ponton mért feszültség frekvenciája,
f_{50Hz}	a mindenkori hálózati feszültség frekvenciája.

Ennek következtében szigetüzem létrejöttkor a csatlakozási ponton a frekvencia c_{f0} -nak köszönhetően növekedni fog, a növekedés miatt a pozitív visszacsatolással c_f értéke megnő, így a frekvencia még meredekebb emelkedésnek indul, aminek köszönhetően a c_f értéke még jobban növekszik. Ez egészen addig tart, ameddig a frekvencia értéke el nem éri a védelem érzékelési határának megfelelő értéket, amikor is az kioldási parancsot ad. Belátható, hogy a pozitív visszacsatolással lényegesen gyorsabb működés valósítható meg.

Az aktív védelmi módszerek többségének előnyei inverteres táplálás esetén használhatók ki maximálisan. Azonban figyelembe véve, hogy az elosztottan termelő háztartási méretű kiserőművek közül a napelemes rendszerek terjednek a leggyorsabban, illetve a megújulókat használó energiatermelők másik, már kifejlett technológiával rendelkező csoportja a szinkron generátorként termelő szélerőművek (amelyek szintén inverteren keresztül csatlakoznak a hálózathoz) az aktív védelmi módszerek nagyobb szerephez juthatnak a szigetüzem felismerésére tervezett védelmekben.

A későbbiekben csak a kiserőművek digitális védelmeiben megvalósított passzív szigetüzem elleni védelmi módszerek modellezésével fogok foglalkozni.

3 EMTP- Electromagnetic Transient Program

Az EMTP, vagyis az Elektromágneses Tranziens Program (Electromagnetic Transient Program) világszerte az egyik leggyakrabban alkalmazott elektromágneses tranziens elemző és digitális szimuláló szoftver, amelyet Hermann W. Dommel professzor a kései 1960-as években alkotott meg Németországban. A program nemzetközi szintű fejlesztése azóta több párhuzamos irányban is halad folyamatosan, aminek köszönhetően ma már több különböző altípusa is elérhető (pl. EMTP-RV, MT-EMTP, eMEGAsim, stb.). Ezek egyike az *EMTP Alternative Transients Program (EMTP-ATP)*, amelyet 1984 óta fejlesztenek, és amelyet diplomatervem készítése során használok. [13]

3.1 EMTP-ATP (Alternative Transients Program) [14]

Az EMTP-ATP elsődleges alkalmazási területei olyan vizsgálatok folytatása, ahol elsősorban nem a hálózat lassú változásaira (load flow számítás, zárlatszámítás, hálózati szinkron stabilitás, stb.) felírható egyenleteken alapuló modellezés a cél, hanem ennél lényegesen kisebb időintervallumban, nagy időbeli felbontást igénylő (nagyfrekvenciás) jelenségek viselkedésének a szimulálása.

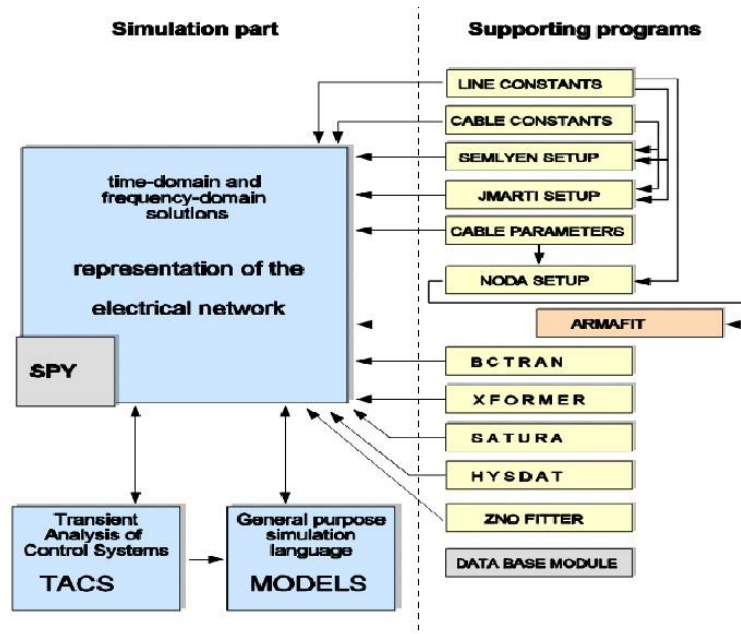
Az ATP használata a következő főbb területek vizsgálatát és elemzését teszi lehetővé [16]:

- Villámcsapások keltette túlfeszültségek modellezése
- Kapcsolási tranziensek
- Villamos forgógépek modellezése
- Tranziens stabilitás, motorindítás modellezése
- Transzformátorok, söntfojtók, söntkapacitások kapcsolása
- Ferrorozonancia (nemlineáris induktivitások és kapacitások esetén)
- Teljesítményelektronikai alkalmazások
- Megszakítók, áramlevágás
- FACTS eszközök
- Harmonikus analízis és villamosenergia-minőségi vizsgálatok
- Védelmi eszközök tesztelése

A felsorolás a teljesség igénye nélkül történt, és a leggyakoribb felhasználási területeit mutatja be.

3.2 Program felépítése

Az EMTP-ATP program több különböző modulból épül fel, amelyet a 3-1. ábra mutat be. A program moduljai alapvetően megkülönböztethetők funkcionális szerepük alapján szimulációt végző és a szimulációt támogató egységekre.



3-1. ábra: EMTP-ATP felépítése [17]

3.2.1 Szimulációt végző egység

A program a szimulációkat idő- és frekvenciatartományban is képes futtatni, ettől függően eltérő számítási módszereket használ fel a modell ismeretlen változóinak meghatározásához. A felhasználó maga döntheti el melyik alkalmasabb az általa vizsgált probléma elemzéséhez. Diplomatervem készítéséhez időtartománybeli szimulációkkal foglalkoztam.

A program működési módszerének alapismerete azért szükséges, hogy a felhasználó tisztában legyen azzal, hogy milyen szabályok betartása elengedhetetlen a szimuláció helyes működéséhez.

Az időtartománybeli számítások elvégzéséhez az ATP a csomóponti feszültségek módszerét használja, vagyis a modell állapotváltozói a hálózat csomópontjainak feszültsége. Az egyes elemeken folyó áram e feszültségek függvényeként kerül meghatározásra. A számítás elvégzése természetesen csak diszkrét időben lehetséges, így egy adott t időpillanatban az ismeretlen változók meghatározásához szükséges a rendszer $t-\Delta t$ időpillanatbeli állapotát ismerni. A Δt időt szokás számítási időlépés nevezni, és elegendően kicsinek kell ahhoz lennie, hogy a differenciálegyenleteket differenciaegyenletekkel lehessen közelíteni. [17]

A Δt számítási időlépés nagysága a program beállításai között megválasztható, és értéke fontos szerepet játszik a számunkra releváns tranziens jelek megjelenésének alakhűsége szempontjából. Néhány fontos szempont, amelyet érdemes figyelembe venni a számítási időlépés helyes megválasztásához:

- A távvezetéseken a feszültség és áramhullámok véges terjedési sebességgel haladnak, így a távvezeték egyik lényeges paramétere a befutási idő, vagyis az az idő, amennyi idő alatt egy feszültség-hullám a vezetéken végponttól végpontig eljut (ezt követően lezárástól függően reflexió következik be). 100 km-es veszteségmentes szabadvezeték feltevése (aminek hullámterjedési sebessége $\approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$) a befutási idő közel 30 μs , így ennél nagyobb Δt választásakor a távvezeték végén nem alakhű jelalak jelenne meg. A Δt ilyen szempontbeli helytelen megválasztásakor a program hibaüzenettel figyelmeztet, és nem fut le.
- A hálózatban lévő RLC elemek feszültség-áram jelalakjának vizsgálatához annak sajátfrekvenciájánál nagyobb frekvenciájú (vagyis kisebb Δt) időlépés választása szükséges.
- Véges homlokidejű hullámok esetén (pl. villámcsapás szimulálása, nem ideális egységugrás, stb.) a homlokidőnél kisebb időlépés megválasztása szükséges, ellenkező esetben elveszik a véges homlokidő által hordozott pluszinformáció a szimulációból.
- TACS elemek használata esetén 1 μs időlépték a maximális felbontás.
- TACS és akár az általunk (vagy mások által) készített MODELS elemek használata esetén előfordulhat, hogy az elem működéséhez elengedhetetlen egy egész korábbi periódus eltárolása, emiatt az elem a frekvencia és az időlépés által meghatározott mintaelemszámnak megfelelő memóriahelyet foglal. Ennek következtében Δt -t úgy kell megválasztani, hogy az $\frac{1}{f \cdot \Delta t}$ hányados egészszámú legyen.

A szimulációhoz további két modul tartozik: a *TACS (Transient Analysis of Control Systems)*, illetve a *MODELS*.

3.2.1.1 *TACS (Transient Analysis of Control Systems)*

Alapvetően szabályozástechnikai szimulációk időtartománybeli vizsgálatára kialakított modul. A programban tipikus alkalmazási területei az inverterek vezérlése, generátorok gerjesztésszabályozása, teljesítményelektronikai eszközök modellezése, vagy akár a zárlatkor és a megszakítók működésekor kialakuló villamos ívek modellezése. A felhasználó elsősorban a program elemkészletében található, a program belső programozási nyelvén írt TACS eszközök

formájában találkozunk e modullal. Ilyen eszközök használata esetén a program számára külön illesztő elemek elhelyezésével jelezni kell, hogy a TACS modul számításait is fel szeretnénk használni a szimulációban. Ezt érzékelve a TACS elemek bemenetére érkező jeleket a program átadja a TACS modulnak, ott megtörténik a számítások elvégzése, majd az eredményeket az említett elem kimenetére továbbítja. A programban ezt követően folytatódik a szimulációhoz szükséges számítások végzése. [17]

3.2.1.2 MODELS [15]

Mivel az EMTP-ATP program (és a TACS) elemkészlete véges, ezért a felhasználhatóság növelése céljából a programba építettek egy magas szintű programozási nyelvvvel rendelkező modult. E modul segítségével a felhasználó új elemeket definiálhat, azok működését pontosan megválaszthatja, más elemek viselkedését vezérelheti és szabályozhatja, vagy az elkészített hálózaton mért mennyiségeket a megfelelő kiértékeléshez szükséges formára alakíthatja. A felhasználó anélkül élvezheti a MODELS programozási nyelv egyszerű struktúrája által nyújtott előnyöket, hogy ismernie kéne az ATP pontos belső programozási nyelvét és működési mechanizmusát.

A programozási nyelv általános felépítése:

```
MODEL      --az elem megnevezése
DATA       --beállítható állandó paraméterek
INPUT      --bemeneti változók
OUTPUT     --kimeneti változók
VAR        --belső változók
CONST      --belső állandók
INIT       --kiindulási értékek definiálása
ENDINIT
EXEC       --működés leírása
ENDEXEC
ENDMODEL
```

A programkód egy *MODEL*-nek nevezett alapegység felépítését mutatja be. A *MODEL* eljárásokból (amelyek leírják az elem működését) és értékkel rendelkező (value-holding) elemekből épül fel. Utóbbiak rendelkezhetnek állandó vagy változó értékkel, az értékadás pedig történhet a *MODEL*-en belülről (*CONST* és *VAR* típusok) vagy kívülről (*DATA* és *INPUT* típusok).

Minden *MODEL* számára két különböző típusú eljárás definiálható. Az elsőben (INIT/ENDINIT) történik meg az inicializálás, vagyis a kiinduló állapot leírása. Ez a blokk csak egyszer, a szimuláció

legelején fut le. A másik eljárásban lehet definiálni az elem valós működését (EXEC/ENDEEXEC), amely a szimuláció minden egyes időlépésében lefut. Ennek megfelelően itt lehet alkalmazni a hasonló programozási nyelvekben (pl. Pascal) is megszokott ciklusszervezési parancsokat, mint a *FOR*, *IF*, *WHILE*, stb. utasításokat. Globális változóként hivatkozhatunk a mindenkori időlépcsőre *TIMESTEP*, illetve a szimuláció aktuális idejére *T* változónevekkel. Ezen kívül számos, a felhasználó munkáját megkönnyítő funkció, függvény került beépítésre. Ilyen például a *DELAY* függvény, amellyel egy változó korábbi értékét lehet meghívni (a meghívás előtt a program számára jelezni kell, hogy az adott változó korábbi értékeit tárolja el) vagy a *BACKTIME* függvény, amely megadja, hogy egy adott változó egy adott értéket utoljára melyik *T* időpillanatban vett fel.

A *MODEL* elkészítése után az elem a hálózat tetszőleges részére elhelyezhető. Ezen kívül a program automatikusan hozzárendel egy kezelőfelületet, amelyen megtekinthetők a be- és kimenteti változók, illetve megadható a *DATA* típusú paraméterek értéke.

3.2.2 Szimulációt támogató egységek

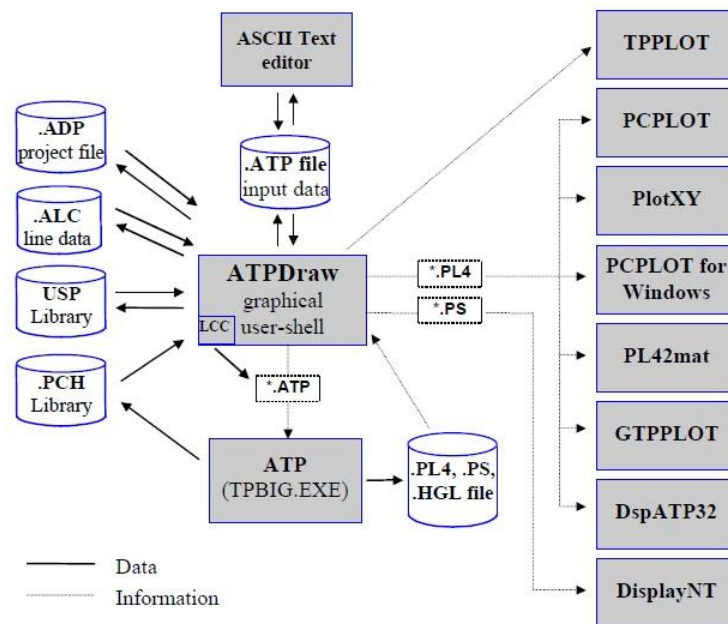
Az *EMTP-ATP* szimulációt végző moduljain kívül a program a hozzájuk szükséges támogató számításokat is végzi. E támogató programok többek között a felhasználó dolgát könnyítik meg azáltal, hogy nem kell az összes elem minden villamos paraméterét meghatározni, hanem a program a felhasználó számára könnyebben hozzáférhető információk alapján (pl. geometria adatokból: távvezeték oszlopkép) gyártói adatokat felhasználva számolja ezek értékeit.

A fenti 3-1. ábraán jelölt támogató programok feladatai [17]:

- *LINE CONSTANTS*, *CABLE CONSTANTS/PARAMETERS*: Távvezetékek és kábelek elosztott paramétereit (például hosszegységre eső induktivitás, kapacitás) számolja geometria paramétereiből.
- *SEMLYEN*, *JMARTI*, *NODA SETUP*: Távvezetékek és kábelek korábban kiszámolt villamos paramétereinek frekvencia-függő modelljét készíti el.
- *BCTRAN*, *XFORMER*: Transzformátor villamos paramétereit számolja ki.
- *SATURA*: nemlineáris tekercsekhez, illetve transzformátorokhoz határozza meg a mágnesezési és telítési görbéket.
- *ZNO FITTER*: Cink-oxid túlfeszültség levezetők nemlineáris karakterisztikáját állítja elő.

3.3 ATPDraw

Az *ATPDraw* az *EMTP-ATP* grafikus interfész programja. A felhasználó ezzel a felülettel találkozik, itt tudja összeállítani a vizsgálandó hálózatot és itt tudja az egyes elemeket paraméterezni. Mivel az *EMTP-ATP* a szimulációkat több különböző program támogatásával végzi, az *ATPDraw* mint egy szimulációs központ is funkcionál, amely e programok működését koordinálja. Az *ATPDraw* és az említett egyéb programok viszonyát a következő ábra szemlélteti:



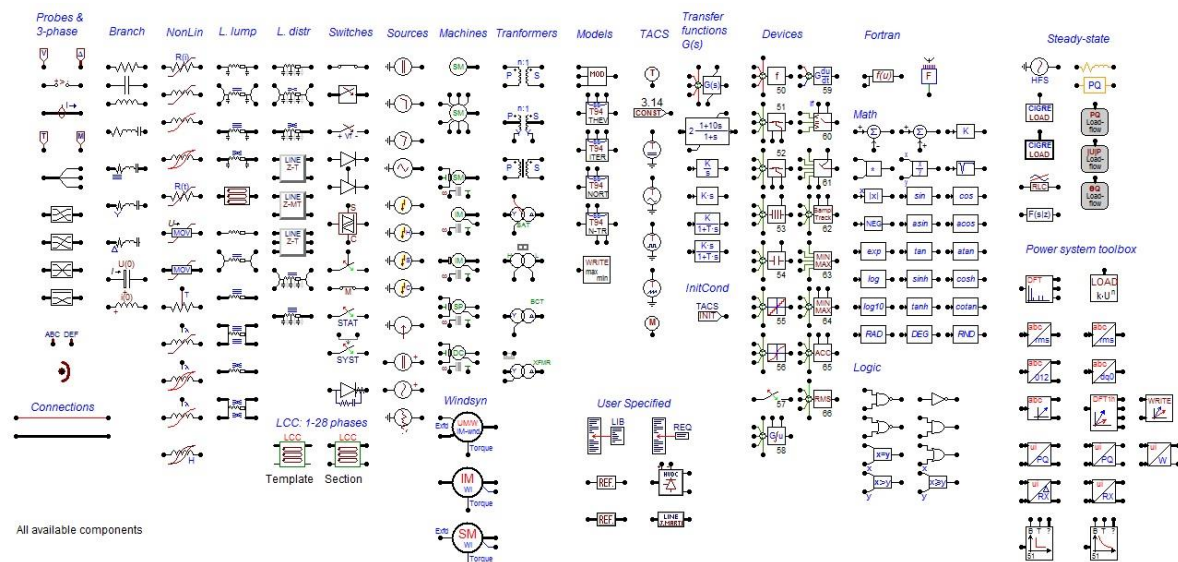
3-2. ábra: EMTP-ATP programcsomag elemei [16]

Az *ATPDraw* felhasználóbarát kezelőfelületén összeállított áramkör szimulációjának futtatása előtt a szoftver a kódot lefordítja és átkonvertálja az *ATP* számításainak elvégzéséhez szükséges formátumba. Ezt követően az *ATP* főprogramban (*TPBIG.EXE*) megtörténik a számítások elvégzése. Ennek része a már korábban említett (*LINE CONSTANTS*, *SEMLYEN*, *BCTTRAN*, stb.) segédprogramok futtatása is. Az eredményeket az *ATP* program eltárolja az 3-2. ábra jobb oldalán látható *.PL4* könyvtárba. Az eredmények az *ATPDraw*-n keresztül különböző szoftverek segítségével vizsgálhatóak, ezek kerültek felsorolásra a 3-2. ábra jobboldalán. Dolgozatom során a *PlotXY* nevű programot használtam.

3.4 ATPDraw elemkészlete

Jelenleg már több mint 200 előre definiált eszköz található az *ATPDraw* elemkészletében, amelyek az 3-3. ábraán láthatóak. Ezeket három csoportra bontva mutatom be: először részletesebben

ismertetem az általam alkalmazott távvezeték és transzformátor modelleket, hiszen viselkedésük ismerete fontos lehet a későbbi szimulációk eredményeinek értelmezésekor. Ezt követően általánosságban és nem túl hosszan írok az elemkészletben található egyéb elemekről, majd végül külön ismertetem az ATPDraw legújabb verziójával a programba került *Power Systems Toolbox*-ot, amellyel alapvető védelmi eszközöket implementáltak.



3-3. ábra: ATPDraw elemkészlet

3.4.1 Vezeték és transzformátor modellek

3.4.1.1 Vezetékek

Vezetékek választásánál a felhasználó alapvetően három típusú modell közül választhat: koncentrált π helyettesítőkép, elosztott paraméterű π helyettesítőkép, vagy LCC modellek közül. Az előző kettő némileg pontatlan eredményt szolgáltat tranziens vizsgálat során, hiszen paraméterei nem frekvenciafüggők, így csak a beállított (hálózati) frekvencián viselkednek valósághűen. Az LCC modell a legpontosabb, természetesen a legösszetettebb is. Dolgozatomban során LCC vezeték modelleket használtam.

Az ATPDraw beszédpanelén beállítható és az általam használt főbb paraméterek az alábbi 3-4. ábraán látható:

3-4. ábra: LCC távvezeték modell beállítási lehetőségei

Alapvetően definiálandó a vezeték jellegén (szabadvezeték vagy kábel) és fázisszámán kívül a homogén talaj fajlagos ellenállása (Ωm), a kezdő frekvencia, amelytől a megadott sáv szélességben a frekvenciafüggés meghatározásra kerül, illetve a vezeték hossza. Ezen felül lehetőség van fáziscserére, szkin-hatás figyelembevételére és szakaszos földelés kiválasztására is. Tranziens viselkedés vizsgálatához valós transzformációs mátrix választása javasolt az *ATPDraw* útmutatója alapján. [16]

Az LCC vezetékmodellen belül megadható annak típusa. Tranziens viselkedés vizsgálatára a *JMarti*, *Semlyen* és *Noda* modellek a legalkalmasabbak, közöttük jelentős különbség nincs. Dolgozatomban során a *JMarti* típust választottam.

A *Data menüpont* alatt adhatóak meg a vezeték geometria paraméterei: a vezetékek térbeli elhelyezkedése (oszlopkép), sugara, illetve egyenáramú ellenállása. Az első futtatás alkalmával ezekből az adatokból történik meg az egyéb szükséges villamos paraméterek számolása.

3.4.1.2 Transzformátorok

Az *ATPDraw* programban négy különböző típusú transzformátor választható: ideális, telítődő, *BCTAN* és *Hybrid* modell. Az első háromból van egy- és háromfázisú kivitel is, míg utolsóból csak háromfázisú. A telítődő transzformátornál a vasmag nemlineáris karakterisztikája táblázatos

formában definiálható. A *Hybrid* modell a legösszetettebb, a vasmag geometriai alakja is beállítható. E modell pontos működésében nem mélyedtem el bonyolultsága miatt, dolgozatomban *BCTRAN* típusú transzformátorokat használtam.

E modellnek két, illetve három tekercseléses változata is van. Megválasztható a kapcsolási csoportja és óraszám, villamos paramétereit a program gyártói adatok alapján megadható üresjárási és rövidzárási adatokból számolja. Beállításom alapján a transzformátor a vasmag mágnesezési görbéjének lineáris szakaszán működik, telítődést nem vesz figyelembe. [16]

3.4.2 Egyéb elemek

Az *ATPDraw* elemkészletének további elemeit a 3-3. ábraán látható felosztás szerint csoportosítva ismertetem.

- *Érzékelők és segédelemek:* A program minden csomópontra kiszámolja a feszültség- és áramértékeket, azonban ahhoz, hogy ezek megtekinthetők legyenek, a programnak ki kell mentenie az adatokat egy külön fájlba, amely azután ábrázolható egy másik szoftver segítségével (pl. *PlotXY*). Az érzékelők hálózatra való elhelyezésével jelezhető a program számára, hogy melyek azok a csomópontok, amelyek érdeklik a felhasználót. eltérő típusú érzékelők elhelyezése szükséges attól függően, hogy feszültség, áram, *TACS* vagy *MODELS* típusú kimenetről van szó. A segédelemekhez tartoznak olyan elemek, amikkel például a referencia fázissorrendet lehet meghatározni, vagy ciklikus fáziscserét lehet megvalósítani, illetve olyan eszköz is, amivel a háromfázisú vezeték három darab egyfázisú vezetékké szétválasztható.
- *Lineáris és nemlineáris hálózati elemek:* Lineáris egy- és háromfázisú R, L, C és RLC elemek tartoznak ide, illetve utóbbiból csillag- és deltakapcsolású változat is elérhető. A nemlineáris elemek között különböző típusú R és L modellek találhatók, amelyek karakterisztikája különbözőképp képezhető le.
- *Kapcsolók:* Egy- és háromfázisú kapcsolók használhatóak, amelyek működését a szimulációs idő, feszültség vagy *TACS* jelek vezérlik. Fontos megjegyezni, hogy a *TACS* által vezérelt kapcsoló nem az áram nullátmenetében kapcsol (ellentétben az idővezérelt kapcsolóval), így használata kellő körültekintést igényel. Ezen kívül a csoport részét képezik a diódák, tirisztorok és triac modellek is.

- *Források:* Legfontosabb az ideális AC forrás, amelynél kiválasztható, hogy feszültség- vagy áramgenerátor típusú legyen. Beállítható a fázisszáma (egy és három), amplitúdója, illetve, hogy ez csúcs- vagy effektív-, illetve vonali- vagy fázisérték. Megválasztható továbbá az indulási fázisa és a be- és kikapcsolási ideje. Ezen kívül sok más típusú forrás is az elemkészlet része: például a DC forrás, impulzus forrás, véges homlokidejű négyszög jel, TACS vezérelt forrás, stb.
- *Villamos gépek:* különböző típusú és bonyolultságú szinkron-, valamint aszinkron gépek választhatóak. Dolgozatomban a legegyszerűbb, 59-es típusú szinkrongenerátor modellt használtam. A modellek bonyolultsága miatt az egyes típusok különbözőségeiben nem mélyedtem el.
- *MODELS:* alapértelmezett, kitöltetlen *MODEL* elemet lehet választani a tetszőleges funkciójú elem elkészítéséhez.
- *TACS:* itt találhatóak meg a leglényegesebb *TACS* eszközök, mint például az effektívérték mérő, frekvenciamérő, különböző *TACS* kapcsolók és késleltető elemek is. Ezenfelül integráló, deriváló és szűrő jellegű eszközök is megtalálhatóak, illetve az alapvető matematikai, trigonometria és logikai műveletek áramköri elemként való leképezése is.
- *Steady-state:* olyan elemek találhatóak itt meg, amelyek értelmezése csak a kiinduláskor esedékes, utána az elem már nem része a hálózatnak. Ezenfelül harmonikus, valamint load-flow elemzésekhez definiált források választhatóak.

3.4.3 Power Systems Toolbox

A *Power Systems Toolbox*-ban található eszközök az *ATPDraw* 5.9-es, legújabb verziójának megjelenése óta képezik a hivatalos elemkészlet részét. Előnyük, hogy *MODELS* nyelven kerültek implementálásra, így egyrészt a felhasználó beleláthat azok pontos működésébe, illetve igény szerint módosításokat is végezhet rajtuk. Hátrányuk, hogy a *MODELS* nyelven írt eszközök futása némileg lassabb.

3.4.3.1 Fontosabb elemek:

- *DFT-t képző algoritmus:* az eszköz a bementére adott időben változó jel alap- és felharmonikusait számolja, kimenetére a fázor abszolút értékét és fázisát adja. Maximum 26 harmonikust képes számolni, illetve a DC komponenst.

- *Egy- és háromfázisú teljesítménymérők*: az elem a bemeneti áram- és feszültségjelek alapharmonikusát veszi, és meghatározza a pillanatnyi hatásos- és meddőteljesítmény értékeket mindhárom fázisra együtt, vagy akár fázisokra bontva külön-külön is.
- *Szimmetrikus összetevőket számoló algoritmus*: a bemenetére kapcsolt háromfázisú időfüggvényekből számolja a zérus, pozitív és negatív sorrendi összetevőket. Kimenatként az egyes összetevők valós és képzetes része szolgál.
- *DQ0 összetevőket számoló algoritmus*: bemeneti fázismennyiségekből a forgógépeknél alkalmazott DQ0 összetevőket számolja ki. A többi elemtől eltérően nem *MODELS*, hanem *TACS* típusú eszköz.
- *Bemeneti impedancia mérő*: a mérőponti áram és feszültségjelek vonali vagy fázisértékéből számol bemeneti impedanciát.
- *Fázis értékből fazort képző algoritmus*: egy időben változó periódikus jel alapharmonikus fazorának valós és képzetes részét adja a kimenetén.

3.4.3.2 Védelmi berendezések

A Power Systems Toolbox négy védelmi készülék modellet tartalmaz:

- Független késleltetési túláramvédelmi berendezés modell
- Áramtól függő késleltetésű túláramvédelmi berendezés modell
- Távollási védelem berendezés modell
- Differenciálvédelmi berendezés modell

Dolgozatom során középfeszültségű hálózatokkal dolgoztam, illetve a generátorok védelmeit vizsgáltam, így távolságvédelmi és differenciálvédelmi eszközöket nem használtam. Előbbi háromfokozatú poligon karakterisztika alapján működik, ahol tetszőleges alakú konvex karakterisztika állítható be. Utóbbi figyelembe veszi az alap és második harmonikus összetevőket (vagyis bekapcsolási áramlökést is figyelembe lehet vele venni), és a be- valamint a kifolyó áramok eltérése függvényében ad kioldási parancsot.

A független késleltetésű túláramvédelem csak annyiban tér el az áramtól függő késleltetésű túláramvédelemtől, hogy értelemszerűen a kioldás késleltetése nem függ az áram nagyságától, tehát a megszólalási áramérték felett konstans idejű.

Az áramtól függő késleltetésű eszköz késleltetési idejének karakterisztikája a következő (4) képlet alapján kerül meghatározásra:

$$ts = D * \left(\frac{A}{\left(\frac{I_{RMS}}{I_S} \right)^Q - 1} + B \right) \quad (4)$$

ahol

I_S a beállított indítási áram értéke,

I_{RMS} a védelmi készülék által mért áram effektívértéke,

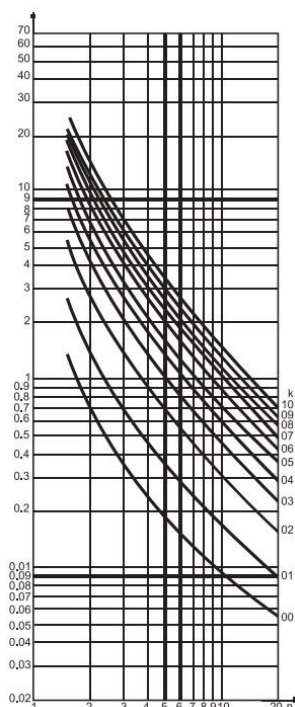
D tetszőlegesen beállítható szorzó,

A, B, Q az IEC vagy az IEEE szabványokban meghatározott állandók:

IEEE	Normal-Inverse	Very Inverse	Extremely Inverse
A	0,0515	19,610	28,20
B	0,1140	0,4910	0,1217
Q	0,02	2,00	2,00

1. táblázat: IEEE szabvány túláramvédelem késleltetésére

Az ATPDraw-ban megtalálható túláramvédelmi eszközben az alapbeállítás az IEEE Very Inverse (VI) elnevezésű karakterisztika. Különböző D értékekre a megfelelő görbék az 3-5. ábraán láthatóak.



3-5. ábra: IEEE Very Inverse karakterisztika [18]

4 Kiserőművek védelmi berendezésekre gyakorolt hatásainak vizsgálatára alkalmas szoftver környezet létrehozása

Az *ATPDraw* előző fejezetben ismertetett eszközeinek felhasználásával egy olyan *Naf/Köf* transzformátorról ellátott hálózatrészt elkészítését tűztem ki célul, amely alkalmas a kiserőművek hálózatra, és annak védelmi készülékeire gyakorolt hatásainak bemutatására. Az elkészített modell nem csupán a megvalósított hálózatrész egyes hibalehetőségeinek bemutatására alkalmas, hanem rugalmas átalakíthatósága és könnyű bővíthetősége miatt tetszőleges scenáriók elemzését teszi lehetővé.

E fejezet első felében ismertetem az általam kialakított fiktív hálózatrész felépítését és a kialakításakor figyelembevett szempontokat, második felében bemutatom az *ATPDraw* eszközeinek segítségével elkészített védelmi eszközök kialakítását, működését és beállításszámolását, végül a fejezet harmadik felében a hálózatra csatlakozó kiserőmű hatásainak elemzésével foglalkozom.

4.1 Modell bemutatása

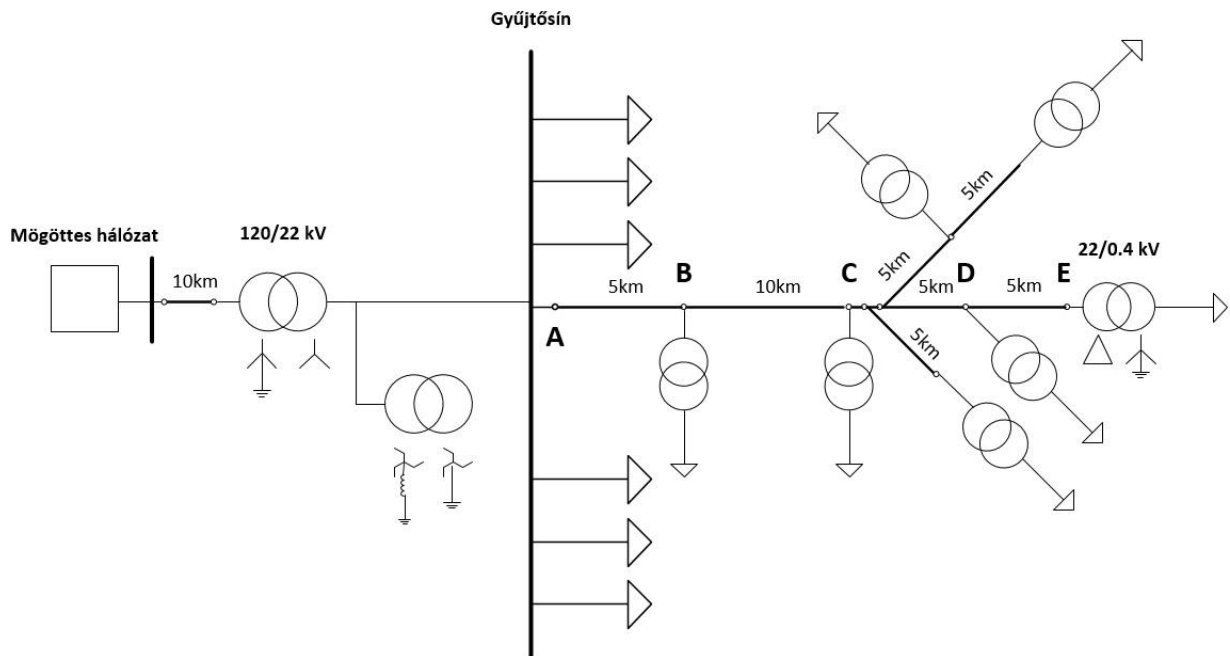
A *Naf/Köf* transzformátorról ellátott hálózatrész modelljének kialakítása során a következő szempontokat vettem figyelembe:

- Valóságghú hálózati topológia
- Valóságghú geometriai és villamos paraméterek
- Kompenzált hálózat jellegzetességei
- Fogyasztók harmonikus termelése
- Rugalmasan változtatható harmonikus kibocsátás
- Különböző vizsgálatokhoz szükséges könnyű és rugalmas bővíthetőség, átalakíthatóság

4.1.1 Általános leírás, egyszerűsített egyfázisú hálózatkép

A közép feszültségű hálózat betáplálása egy 120/22kV-os 16MVA-es transzformátoron keresztül valósul meg, a hálózat egy külön zeg-zug kapcsolású transzformátor csillagpontja és a föld közé iktatott Petersen-tekerccsel kompenzálva van. A közép feszültségű gyűjtősínról 7 darab leágazás

indul és egy leágazás főága 25 km hosszú. A leágazás 15. km-e után két oszlopkapcsolóval leválasztott szárnyvezeték indul, az egyik 10, másik 5 km hosszán. Egy leágazáson összesen 7 darab *Köf/Kif* transzformátor található, egyenként 250kVA-esek. A leírt hálózatot a 4-1. ábra szemlélteti.

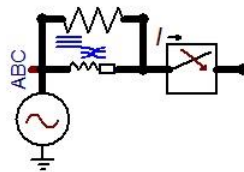


4-1. ábra: Egyszerűsített egyfázisú hálózatkép

4.1.2 Mögöttes hálózat leképezése

Az elkészített hálózatrészen a mögöttes hálózat leképezése annak figyelembevételével történt, hogy az megfelelően viselkedjen mind normál, hibamentes üzemállapotban és tranziens jelenségek zajlása esetén is. Az energiaforrás egy ideális, belső ellenállás nélküli feszültségforrás, amely 120kV-os 50Hz-es feszültségjelet generál. A mögöttes hálózat a zárlati teljesítményével jellemezhető, amelyet a szimuláció során a feszültségforrást követő soros RL elem megfelelő beállításával lehet definiálni. Ennek értelmében az induktivitás értékét 25 mH-re választottam, ami nagyságrendileg 2000 MVA zárlati teljesítményt jelent 120 kV-on és 50 Hz-en. Pontos értéke a szimuláció eredményét szignifikánsan nem befolyásolja a közép és kiefeszültségű impedanciák nagysága miatt, nagyságrendi értéke a fontos. Tranziens jelenségek zajlásakor igen nagyfrekvenciájú áram- és feszültség hullámok terjednek, így e hullámok szempontjából a soros RL elemmel modellezett mögöttes hálózat impedanciája közel szakadásként vehető figyelembe, amely hamis eredményt szolgáltatna. Ennek kiküszöbölésére a soros RL elemmel párhuzamosan egy ellenállást kapcsoltam, amely értékére a mögöttes hálózaton feltételezett távvezetékek

hullámimpedanciáját, $200\ \Omega$ -ot választottam (4-2. ábra). Ennek értelmében a nagyfrekvenciás áram- és feszültség hullám ezen ellenálláson olyan mértékű reflexiót szenved, amekkora a valós hálózaton is bekövetkezne, annyi különbséggel, hogy ezt követően a hullámimpedanciával helyettesített távvezeték átteljes oldalán történő reflexióból eredő visszaverődések már elhanyagolásra kerülnek. Megfigyelhető, hogy 50 Hz-es hullámok esetén a soros RL elem a domináns, míg a frekvencia növekedésével a hullámellenállás lesz az.



4-2. ábra: Mögöttes hálózat leképezése

4.1.3 Középfeszültségű hálózat kompenzálása [19]

Magyarországon a középfeszültségű szabadvezetékes hálózatok esetén a Petersen-tekerccsen keresztül földelt csillagpontkezelési módot alkalmazzák. A csillagpontkezelésnek nagy áramú zárlatok (3F, 3FN, 2F, 2FN) során nincs jelentősége, hiszen ebben az esetben a zárlatos hálózatrészt a lehető leggyorsabban le kell kapcsolni, egyfázisú földzárlatok esetén (amely a szabadvezetékes hálózatokon keletkező zárlatok közel 80%-a) azonban fontos szerepe van.

Szigetelt csillagpont esetén egyfázisú földzárlat kialakulásakor a hálózat kapacitásain keresztül záródó kapacitív zárlati áram folyik. Amennyiben a kapacitások elegendően kicsik, úgy a zárlati ív spontán kialvása lehetséges, és ebben az esetben nem kell az adott hálózatrészt kikapcsolni, így hálózati kiesések kerülhetők el. A szigetelt csillagpontkezelési mód hátránya, hogy adott földkapacitás felett a zárlati ív spontán kialvásának esélye lecsökken és a nagy kapacitív zárlati áram miatt fennáll az ívelő földzárlat lehetősége is. Ez a többi fázisban hosszú időn át fennálló feszültségemelkedés-sorozatot generál, ezáltal ezek szigetelését is károsíthatja, megnövelve egy újabb földzárlat kialakulásának esélyét, ami már nagyáramú, kettős földzárlatot (2Ff zárlat) eredményez. Ezen kívül a zárlati áram a földelési ellenállásokon feszültségemelkedést okoz, amely baleset- és életvédelmi szempontból kockázatot jelent. Ezek miatt korlátozzák a megengedett földzárlati áram nagyságát, amely szigetelt csillagpont esetén a hálózat kiterjedésének állít korlátot

(hiszen a vezetékek számának és hosszának növelésével növekszik a rendszer földkapacitása, így kapacitív zárlati árama is).

Kompenzált hálózat esetén a transzformátor csillagpontja és a földpont közé Petersen- tekercset kapcsolnak, amelyen helyes méretezés esetén közel ugyanakkora induktív áram folyik, mint amekkora kapacitív áram a földzárlatos ponton, így annak áramát kompenzálja, ezáltal az íves FN zárlat magától megszűnik. Emiatt a kompenzált hálózatok kiterjedése ilyen szempontból nincsen korlátozva, hiszen a tekercs induktivitása tetszőlegesen, a földkapacitásoknak megfelelően megválasztható. A megoldás fizikai hátterében az áll, hogy a földkapacitások és a Petersen-tekercs csak a hálózat zérus sorrendű helyettesítő modelljében jelenik meg, ahol megfelelő hangolás esetén párhuzamos rezgőkört alkotnak, így a hálózat alapharmonikus frekvenciáján nagy impedanciás elemnek tekinthető, amin csupán kis zárlati áram fog folyni.

Fontos megjegyezni, hogy a Petersen- tekercs induktitásának megválasztásakor a zárlati áram 50 Hz-es komponensének kompenzálására törekszenek, így a zérus sorrendű rezgőkör a tranziens frekvenciájú áramok és felharmonikusok számára nem jelent szakadást.

Figyelembe véve, hogy a hálózat maga és a Petersen- tekercs is veszteséges, így valójában ohmos-kapacitív áramot kellene ohmos-induktív árammal kompenzálni, ami tökéletesen nem megvalósítható, hiszen az áramnak mindenféleképpen marad ohmos összetevője. Ezt nevezik ohmos maradékáramnak. E maradékáram az ív kialakása érdekében nem lehet több 10-20A-nél.

Ezen okok miatt az általam készített hálózat szabadvezetékes, középfeszültségű oldalát kompenzált csillagpontkezeléssel valósítottam meg. Ahogy azt a valóságban is szokás, a Petersen-tekercset nem a 120/20kV-os transzformátor középfeszültségű oldalának csillagpontjába helyeztem el, hanem egy külön csillagpontképzésre szolgáló zeg-zug kapcsolású transzformátor csillagpontjába. Egyrészt azért, mert a Naf/Köf transzformátor csillagpontjában a FÁNOE (Földzárlati áramnövelő ellenállás) kerül bekötésre, másrészt pedig ellenkező esetben (feltételezve, hogy a Naf/Köf trafó kivezetetlen delta kapcsolású tercier oldallal is rendelkezik) a 120kV-os oldali 1FN zárlat esetén a zérus sorrendű áramok a Petersen-tekercsen keresztül folyva nagy csillagponti potenciálemelkedést okoznának a zárlatmentes, ép középfeszültségű hálózaton. A középfeszültségű hálózaton keletkező 1FN zárlat esetén a zérus sorrendű áramkör a nagyfeszültségű oldal felé is nyitott lenne, amely következtében nem csak a középfeszültségű

hálózat földkapacitásai lennének kompenzálva, hanem a 120kV-os oldalé is, amely a kompenzálásnak nem célja. [19]

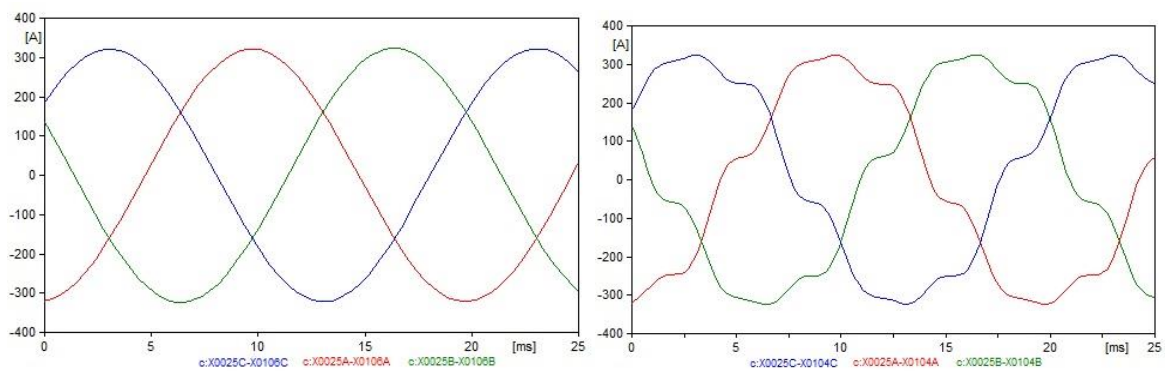
4.1.4 Fogyasztók

A hálózat kiefeszültségű oldala egyszerűsített, az egyes fogyasztókat koncentráltan modelleztem. Wattos fogyasztásokat ellenállással, míg meddőteljesítmény igényüket tekercssel képeztem le. Egy Kőf/Kif transzformátor kiefeszültségű oldalán e fogyasztók háromfázisú hatásos teljesítmény igénye 160kW, a fogyasztók csatlakozási pontján a $\cos\varphi = 0,95$.

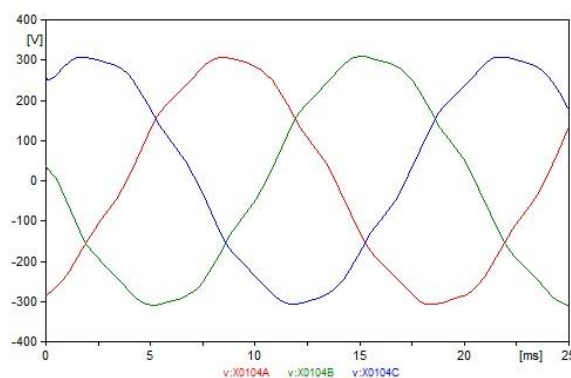
A nemlineáris fogyasztók árama szinuszos feszültség esetén nem szinuszos, amely áram a hálózat impedanciáin feszültségesést okoz, így a hálózat egyes pontjainak feszültségében az 50Hz-es alapharmonikus komponensen kívül más frekvenciájú összetevők is megjelennek. A fogyasztók e harmonikus termelését párhuzamosan kötött, megadott frekvenciájú ideális áramforrásokkal modelleztem.

A kiefeszültségen kialakuló háromfázisú 3. harmonikus a Kőf/Kif transzformátor delta-földelt csillag kapcsolása miatt a középfeszültségű oldalra szimmetrikus esetben nem terjed át, hiszen az fáziskövetési sorrendjének megfelelően zérus sorrendű harmonikusnak számít ($I_3^B = I_3^A e^{-j(3 \cdot 120)} = I_3^A$, illetve $I_3^C = I_3^A e^{j(3 \cdot 120)} = I_3^A$), emiatt a 150 Hz-es 3. harmonikust leképező áramforrást nem helyeztem el a hálózaton. Ellenben 5. és 7. harmonikus (250 és 350Hz) áramforrásokkal a hálózati modell kiegészítésre került, az 5. harmonikus alapértelmezésben a fogyasztók névleges áram 10%-ának megfelelő effektív értékű áramot, a 7. harmonikus pedig az 5. harmonikus áramának 80%-át injektálja a hálózatba. A 9. harmonikus a 3.-hoz hasonló megfontolásokból nem került leképezésre, a 11. és 13. harmonikus pedig az 5. és 7. harmonikus mellett elhanyagolásra került. Az e fölötti harmonikusokat az előbb említett megfontolásokhoz hasonlóan nem realizáltam. A valóságban természetesen nem szükségszerűen alacsonyabb a magasabb rendű felharmonikusok effektív értéke, a 7. harmonikus feletti elhanyagolások a hálózati modell célját tekintve nem túlzóan nagyvonalúak.

Az alábbi 4-3. ábraán egy Kőf/Kif transzformátor kiefeszültségű oldalán folyó harmonikus kibocsátás nélküli és a fentebb említett alapértelmezéssel beállított harmonikus kibocsátás esetén folyó áramok, illetve a 4-4. ábraán a kiefeszültségű oldal feszültségei láthatóak.



4-3. ábra: 0.4kV-on folyó áramok harmonikus kibocsátás nélkül (bal) és harmonikus kibocsátással (jobb)



4-4. ábra: 0.4kV-os oldal feszültségei harmonikus termelés mellett

Megjegyzésre érdemes, hogy a fogyasztókon kívül egyéb hálózati elemek is felelősek lehetnek a hálózaton megjelenő harmonikusokért (pl. transzformátorok nemlineáris mágnesező impedanciája miatt fellépő felharmonikusok), azonban ezt a modellemben nem vettem tekintetbe, mert a terhelések miatti harmonikusok mellett elhanyagolhatónak tekintettem.

A hálózaton végezhető eltérő vizsgálatok céljából a könnyű változtathatóság érdekében az egyes felharmonikusok amplitúdóját és kezdőfázisát változóként definiáltam, így egyszerű és gyors változtatások elvégzése válik lehetővé (az egyes harmonikus forrásokat igény szerint nem kell egyesével változtatni, hanem egy érték megadásával az összes módosításra kerülhet). Az egyes paraméterek globálisan az *ATPDraw* programban a „Settings” - „Variables” menüpont alatt változtathatóak.

4.1.5 Transzformátorok, távvezetékek, leágazások

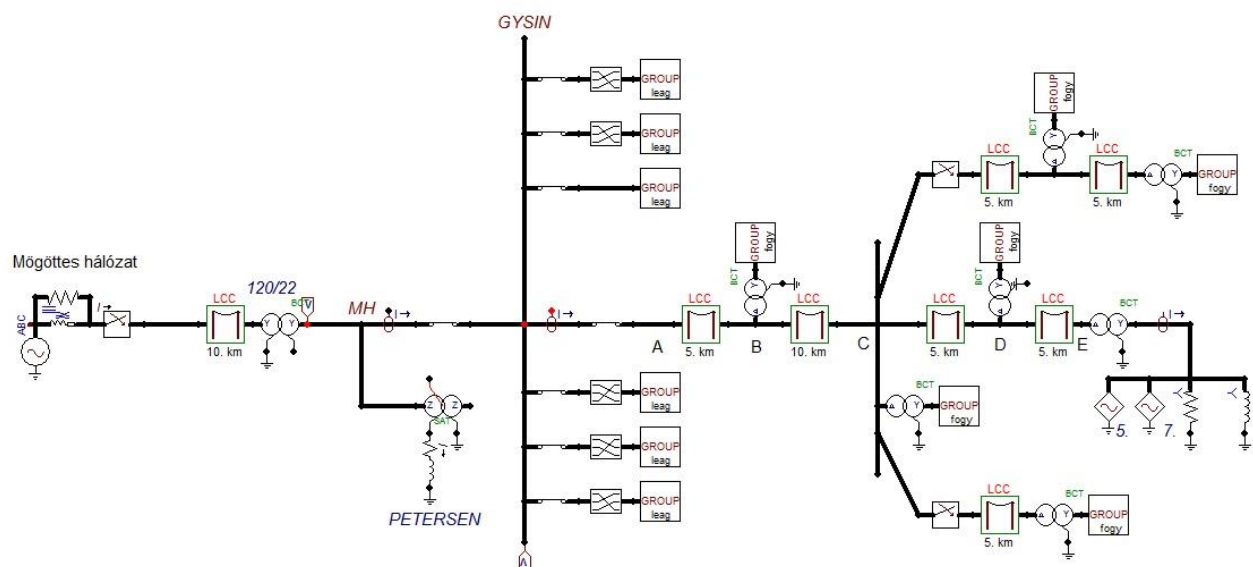
Ahogy az előző fejezetben már említésre került a modellemben *BCTran* transzformátorokat és *JMarti* típusú távvezetékmodelleket használtam. Az 5km-es távvezeték szakaszoknál a befutási idő

olyan kicsi, hogy a szimulációs időlépcsővel azonos nagyságrendbe esik, így ezeket elosztott PI modellként vettem figyelembe. A távvezeték vezetéktípusait 120kV-os oldalon 300/40mm² –es acélhuzal erősítésű alumínium vezetéksodronynak (ACSR), 22kV-on 95mm² ötvöztött alumínium szabadvezeték-sodronynak (AASC) megfelelő paramétereket állítottam be [20]. Behatolási mélységnek az alumíniumra 50Hz-en jellemző 1.2cm-t választottam. A középfeszültségű gyűjtősinről induló egyes leágazások fázisát ABC, BCA, CAB sorrendeknek megfelelően cseréltem, hogy a gyűjtősin feszültsége a lehető legszimmetrikusabb legyen. E szimmetrizálást a valóságban is alkalmazzák.

Az egyes *Köf/Kif* transzformátorokra csatlakozó fogyasztókat csoportokba vontam össze a jobb átláthatóság érdekében. Ugyanezt tettem a gyűjtősinről induló többi leágazással is, minden egyes leágazás csoportban ugyanaz található, mint a nem összevont leágazásban.

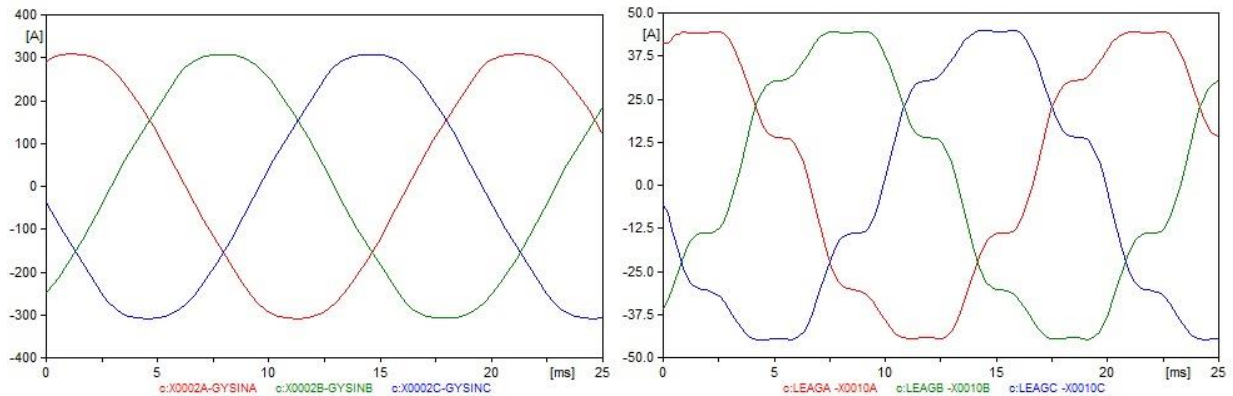
A hálózatban a 7 darab leágazáson összesen közel 8 MW hatásos teljesítmény és 2,5Mvar meddő teljesítmény igénye van a fogyasztóknak. A hálózatrész teljesítmény igényéhez ezen felül még a távvezetékek üzemállapotától függő meddőteljesítmény és wattos veszteség is hozzátartozik.

A leírtaknak megfelelően az elkészített hálózati modell az *ATPDraw*-ban a következőképpen néz ki (4-5. ábra):

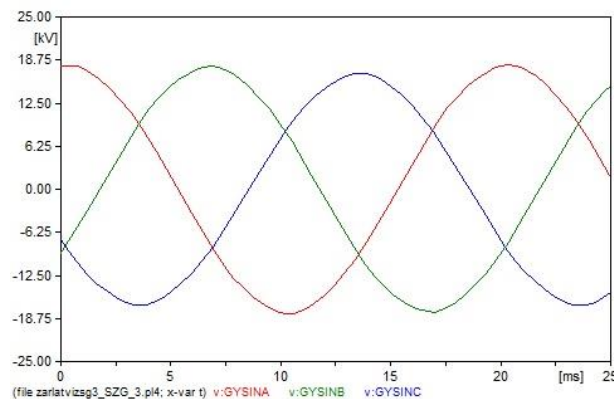


4-5. ábra: Középfeszültségű hálózati modell

Normál, hibamentes üzemállapotban a *Naf/Köf* transzformátor szekunder oldali árama és egy tetszőleges leágazáson folyó áram látható a 4-6. ábraán. Megfigyelhetően a *Naf/Köf* transzformátor szekunder áramában a harmonikus torzítás jóval kisebb mértékű, mint egy leágazás áramában a gyűjtősínről induló leágazások szimmetrizálásának köszönhetően. A középfeszültségű gyűjtősín feszültségét ábrázolja a 4-7. ábra.



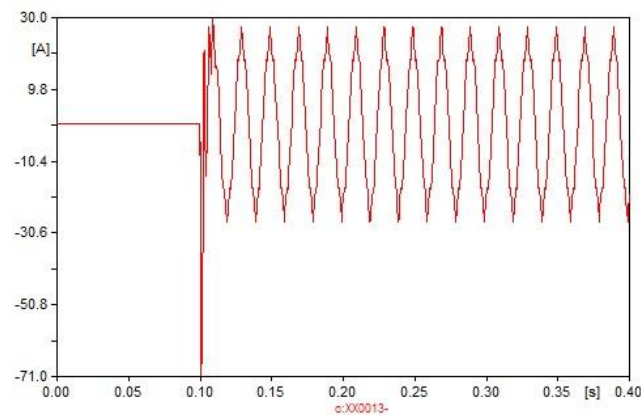
4-6. ábra: Naf/Köf transzformátor szekunder oldali árama (bal) és egy tetszőleges leágazáson folyó áram (jobb)



4-7. ábra: Középfeszültségű gyűjtősín fázisfeszültségei

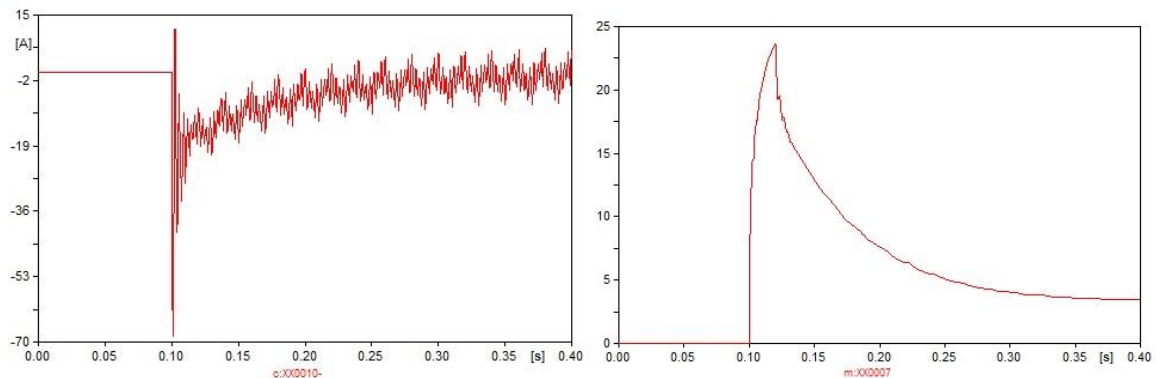
4.1.6 Kompenzálás hatásának bemutatása

Kompenzálás nélkül, szigetelt csillagpont esetén a középfeszültségű hálózat legtávolabbi pontján (E pont) 0.1s-ban keletkező 1FN zárlat esetén folyó zárlati áram (10 Ohmos földelési ellenállást feltételezve):



4-8. ábra: Földzárlati áram szigetelt csillagpont esetén

A zárlat bekövetkeztekor induló tranziens lecsengése a földelési ellenállás nagyságától függ. A zárlati áram felharmonikusokat is tartalmaz. A megfelelő kompenzációhoz a zeg-zug kapcsolású transzformátor csillagpontjába olyan induktivitással rendelkező tekercs választása szükséges, amelyen a csillagponti feszültségemelkedés hatására azonos nagyságú (és ellenkező irányú) áram folyik keresztül. Ennek megfelelően az induktivitás értékét 2170mH-nek választottam (ez 10%-os túlkompenzálást jelent). Az induktivitással sorba kötött 10 Ohmos ellenállás a tekercs veszteségét modellezi. A kompenzáció hatására a hálózat ugyanazon pontján keletkező 1FN zárlat esetén kialakuló zárlati áram és 50Hz-es komponensének effektív értéke:



4-9. ábra: Földzárlati áram és effektív értéke Petersen-tekercsen keresztül földelt csillagpont esetén

Megfigyelhető, hogy a zárlati áram 50Hz-es összetevőjének effektív értéke közel 150ms alatt 5A alá csökken. Az ezt követően fennmaradó zárlati áram a már korábban említett maradékáram.

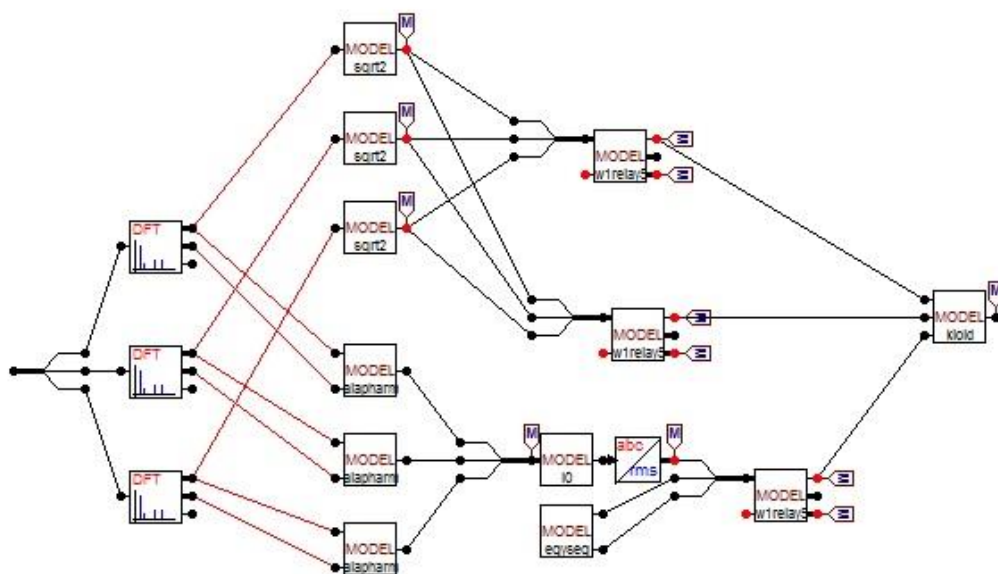
4.2 Középfeszültségű hálózat védelmei

Az általam elkészített fiktív modellen a középfeszültségű szabadvezetékes hálózatokon alkalmazott kétlépcsős túláramvédelmet valósítom meg. A védelem kiegészítésre kerül zérus sorrendű túláramvédelemmel is, amely lehetővé teszi a FÁNOE-val megnövelt zárlati áram szelektív érzékelését. Modellemben a túláramvédelmi készülékeket a gyűjtősínről induló leágazások elejére helyezem el (például A pont), továbbá a Naf/Köf transzformátor szekunder oldalára, vagyis a középfeszültségű gyűjtősín elé, hogy távoli tartalékvédelemként szolgáljon az egyes leágazások védelmeinek. A valóságban e túláramvédelem általában a transzformátor komplex védelmeinek részét képezi, azonban dolgozatomban külön kezelem.

A fejezet e részében bemutatom e védelmek megvalósítását és beállítászámolását. A dolgozat terjedelmi korlátai miatt a középfeszültségű hálózatokra jellemző egyéb védelmeket nem képeztem le (így pl. az egyenáramú gyűjtősínvédelmet, transzformátor differenciálvédelmet vagy visszkapcsoló automatikát).

4.2.1 Védelmi funkciók és felépítés

Az alábbi 4-10. ábraán látható az általam elkészített túláramvédelmi logika *ATPDraw*-ban történő megvalósítása.



4-10. ábra: Kétlépcsős túláramvédelem modell zérus sorrendű áramérzékeléssel

A védelmi eszköz fő feladatát az előző fejezetben bemutatott *ATPDraw* elemkészletében megtalálható *MODELS* nyelven programozott független késleltetésű túláramvédelem végzi. A beérkező áramértékek összehasonlításra kerülnek egy előre beállított megszólalási határértékkel, és amennyiben adott késleltetés idejéig a beérkező értékek meghaladják azt, úgy kioldási jelet ad. E túláramvédelmi elemből három darab található a modellezett készülékben: egy a gyorsfokozatért, egy a késleltetett fokozatért felelős és egy pedig a zérus sorrendű túláramvédelemért. A három elem kioldójele VAGY logikai kapcsolatban áll egymással, vagyis ha bármelyikről kioldójel érkezik, úgy a készülék kioldóparancsot ad az elhelyezett megszakítónak. Az előre definiált túláramvédelmeken apróbb módosításokat végeztem, de lényegi működésén nem változtattam.

A valóságban e védelmi logikák a mintavételezett jelek Fourier komponenseinek alapharmonikus összetevője alapján hoznak döntést a kioldás szükségességéről, emiatt modellemben is ezt valósítottam meg. A fázisáramok harmonikus összetevői egy DFT (diszkrét Fourier transzformáció) algoritmus segítségével kerülnek megállapításra, amelynek kimenetei az egyes harmonikusok abszolút értéke, fázisa és a DC komponens maga. A gyors- és késleltetett fokozat túláramvédelme a beérkező áramok effektív értéke alapján dönt, így a DFT elem alapharmonikusának abszolút érték kimenetéből $\sqrt{2}$ -vel való osztással állítottam elő a szükséges formátumot. Ezt azért tehettem meg ilyen egyszerűen, mert a DFT algoritmussal a nem szükségszerűen szinuszos jel alapharmonikus komponensét képeztem, amely definíciójából eredően már garantáltan szinuszos jel, így effektív értéke minden esetben a csúcserték $\sqrt{2}$ -e.

A zérus sorrendű túláramvédelemhez először a mintavételezett jel zérus sorrendű összetevőjét szükséges meghatározni, amely a fázisáramok összegeként értelmezhető. Valójában ez $3I_0$ -val egyenlő, de fizikai jelentés szempontjából ez szemléletesebb, így a gyakorlatban is ezzel számolnak (amennyiben számolni és nem mérni szükséges, mint ahogy a csillagpontban folyó áramok esetén teszik). Mivel a DFT elem kimenete abszolút érték és fázishelyzet, így a fázisok megfelelő összegzéséhez ezekből az adatokból először a fázishelyes szinuszos jelek előállítása szükséges. Az összegzést követően a zérus sorrendű áram pillanatértéke áll elő, amelynek definíció szerinti effektív értékét kell képezni (hiszen nem is abszolút érték a jel, továbbá nem is szinuszos) a túláramvédelem bemenetéhez.

4.2.2 Túláramvédelem beállításszámítása [21] [22]

Az elkészített védelmi készülékek modelljén be lehet állítani az áram megszólalási határértékét, illetve a késleltetést, amely után a védelem kioldási parancsot ad. A helyes beállításokhoz szükséges számolásokat mind a gyors és késleltetett fokozatra, illetve földzárlati áramérzékelésre is el kell végezni. Külön kezelem a gyűjtősin leágazásain lévő alapvédelmeket és a *Naf/Köf* transzformátor szekunder oldalán lévő tartalékvédelmet.

A számításokat 0,2-es értékű ε biztonsági tényezővel végeztem, amely a relék szórását, áramváltók hibáját, számítási és adatismereti hibákat képez le [21]. Jelen szimulációban, mivel egy fiktív hálózatot építettem (áramváltók nincsenek modellezve, így hibájuk sincsen, továbbá a szimuláció futtatásával a hálózat tetszőleges pontján kialakuló pontos feszültség- és áramértékek rendelkezésre állnak), a biztonsági tényező értéke csökkentésre vagy akár elhagyásra is kerülhetne, azonban a valóságos helyzeteknek megfelelően számolok vele.

A beállítások számolásakor az egyes hibahelyekre a megfelelő zárlatot képeztem, és az beállítandó védelmi készüléknél folyó áramok effektív értékét néztem. Földérintéses zárlatoknál 10Ω oszlopföldelési ellenállást vettem figyelembe.

4.2.2.1 Alapvédelem gyorsfokozata

- Ne szólaljon meg a legközelebbi Köf/Kif transzformátor szekunder oldali maximális rövidzárlatára:

$$I_{BE}^{Gy} \geq \frac{I_{3F,max}^B}{1 - \varepsilon} = \frac{134,75A}{0,8} = 168,5A$$

- Ne szólaljon meg a leválasztható szárnyvezetékek maximális rövidzárlatára:

$$I_{BE}^{Gy} \geq \frac{I_{3F,max}^C}{1 - \varepsilon} = \frac{1095A}{0,8} = 1369A$$

- Szólaljon meg a gerincvezeték elején keletkező minimális zárlatra:

$$I_{BE}^{Gy} \leq \frac{I_{2F,min}^A}{1 + \varepsilon} = \frac{2660A}{1,2} = 2217A$$

Ezek alapján a gyorsfokozat beállítása a következő intervallumba szükséges, hogy essen:

$$1369A \leq I_{BE}^{GY} \leq 2217A$$

A választott beállítás: 1500A.

Késleltetési idő: mivel a gyorsfokozat önidővel működik, így értéke 0ms.

4.2.2.2 Alapvédelem késleltetett fokozata

- Szóljon meg a villamosan legtávolabbi 20kV-os ponton lévő minimális zárlatra:

$$I_{BE}^K \leq \frac{I_{2F,min}^E}{1 + \varepsilon} = \frac{648A}{1,2} = 540A$$

- Ne szóljon meg a legközelebbi Köf/Kif transzformátor szekunder oldali maximális rövidzárlatára:

Alapvédelem gyorsfokozatának első beállítási egyenletével megegyezik, így

$$I_{BE}^K \geq 168,5A$$

- Ne szóljon meg a gerincvezeték maximális üzemi áramára (k_f a felfutási tényező, értéke legyen 1.5, k_e a túláramérzékelő ejtőviszonya, értéke legyen 0.95)

$$I_{BE}^K \geq \frac{k_f}{k_e \cdot (1 - \varepsilon)} \cdot I_{üz,max} = \frac{1,5}{0,95 \cdot 0,8} \cdot 32A = 63,2A$$

Ezek alapján a késleltetett fokozat beállítása a következő intervallumba szükséges, hogy essen:

$$168,5A \leq I_{BE}^K \leq 540A$$

A választott beállítás: 250A.

Késleltetési idő: 300ms.

A késleltetési idő a valóságban ennél nagyobb (kb. 1s) lenne, hiszen a leválasztható szárnyvezetékek védelmét tekintve is szelektívnek kell lennie. A szárnyvezetékek védelme külön nem került modellezésre, így a szimulációs idő és a számítási igény csökkentése érdekében választottam ezt az értéket.

4.2.2.3 Alapvédelem földzárlati áram érzékelés

- Szóljon meg a FÁNOE-vel megnövelt földzárlati áramra

$$I_{BE}^f \leq \frac{I_{FÁNOE,min}^0}{1 + \varepsilon} = \frac{99,45A}{1,2} = 83A$$

A választott beállítás: 75A.

Késleltetési idő: amennyiben ilyen nagyságú zérus sorrendű áramot észlel a védelem, akkor önidővel kapcsoljon ki, így 0ms-ot választottam.

4.2.2.4 Távoli tartalékvédelem

- Szóljon meg bármely leágazás 20kV-os oldalán történő legtávolabbi minimális zárlatra

$$I_{BE}^{Tart} \leq \frac{I_{2F,min}^E}{1 + \varepsilon} = \frac{718A}{1,2} = 598A$$

- Ne szóljon meg a gyűjtősin maximális üzemi áramára

$$I_{BE}^{Tart} \geq \frac{k_f}{k_e \cdot (1 - \varepsilon)} \cdot I_{üz,max} = \frac{1,5}{0,95 \cdot 0,8} \cdot 222A = 438,2A$$

Ezek alapján a távoli tartalékvédelem beállítása a következő intervallumba szükséges, hogy essen:

$$438,2A \leq I_{BE}^K \leq 598A$$

A választott beállítás: 500A.

Késleltetési idő: legyen egy szelektív időlépcsővel nagyobb, mint az alapvédelem késleltetett fokozta: 300ms+300ms=600ms (a szelektív időlépcső a valóságban az előzőhöz hasonlóan természetesen nagyobb lenne).

- A távoli tartalékvédelem földzárlati áramra is szolgáljon tartalékul

$$I_{BE}^{f,Tart} \leq \frac{I_{F\acute{A}NOE,min}^0}{1 + \varepsilon} = \frac{100,6A}{1,2} = 84A$$

A választott beállítás: 75A.

Késleltetés: 300ms (egy szelektív időlépcsővel nagyobb, mint a leágazás védelmének).

4.2.3 Földzárlatos vonal kiválasztása: zérus sorrendű áramérzékelés

Középfeszültségű kompenzált szabadvezetéki hálózatokon a kialakuló földzárlati áram kis értékű, így íves zárlat esetén az várhatóan magától kialszik. Ha valamilyen oknál fogva a zárlat mégsem

szűnik meg, a zárlatos hálózatrészt le kell választani (speciális esetekben lehetőség van földzárlatos üzem tartására, de nem jellemző), azonban a kompenzációnak köszönhető kis áram miatt a hibás leágazást a túláramvédelem nem képes kiválasztani. Ilyen esetben szokás egy rövid időre a *Naf/Köf* transzformátor csillagpontja és a föld közé egy $\approx 50\Omega$ nagyságrendű ún. *FÁNOE* (Földzárlati áram-növelő olajellenállás) ellenállást kötni, amely a Petersen- tekercset gyakorlatilag kisöntöli (hiszen párhuzamosan lesznek kapcsolva), és így a maradékáram jelentősen megnő. E megnövekedett zérus sorrendű áramot a leágazás túláramvédelme már könnyen érzékelni képes. A *FÁNOE*-t az ún. földzárlati áramnövelő ellenállást vezérlő automatika (*FÁVA*) kapcsolja be a csillagponton mért zérus sorrendű feszültség mérésének segítségével. Amennyiben e feszültség egy meghatározott értéket átlép, úgy a beállított késleltetést követően (hiszen időt kell hagyni, hogy az esetleges íves zárlat megszűnjön) rákapcsolja az ellenállást.

E működést a modellemben is megvalósítottam. A zeg-zug csillagpontképző transzformátor csillagpontjában mérem a zérus sorrendű feszültség értékét egy effektívérték mérőn keresztül. A *MODELS* segítségével egy egyszerű kiértékelési logikát írtam meg, amelyben beállítható a zérus sorrendű feszültség határérték, amely felett a *FÁNOE*-t rákapcsolja a csillagpontra. Ezen kívül az a késleltetés megadható, amennyi ideig a vezérlő automatika várja, hogy az íves zárlat megszűnjön. A *FÁNOE* értékének 100Ω -ot választottam, amely magában foglalja a csillagponti és hibahelyi ellenállást is. Késleltetésnek 400ms -ot választottam (a valóságban ez 1-2 másodperc) a zárlati áram Petersen-tekercs miatti kellő mértékű lecsillapodásához. A zérus sorrendű feszültség méréséhez nincsen szükség szimmetrikus összetevők számolására, hiszen a csillagpontban már maga a zérus sorrendű összetevő jelenik meg. Az indulási határértéket (9000V) úgy választottam meg, hogy 2FN zárlat esetén még biztonsággal ne induljon, viszont 1FN zárlat esetében igen. Az impulzus egy *TACS* vezérelt kapcsolót működtet, amely abban a pillanatban kapcsol, amikor megkapta jelet. Ez ebben a helyzetben alkalmazható, hiszen az ellenálláson alapállapotban nem folyik áram, így a bekapcsolás tetszőleges pillanatban megtörténhet (a kikapcsolást már nem szimulálom).

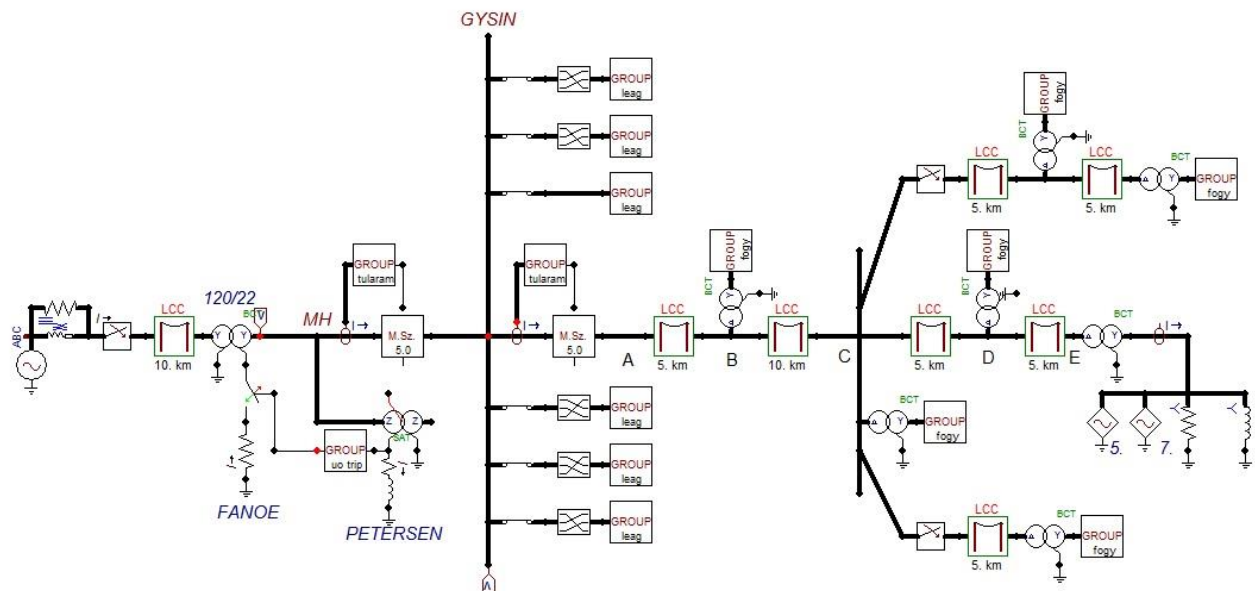
4.2.4 Megszakító

Az ATPDraw elemkészletében többek között idővezérelt és *TACS* vezérelt kapcsolók találhatók. Előbbivel az a probléma, hogy nem kioldóimpulzussal működtethető, hanem azok egy előre

megadott időben kapcsolnak, utóbbival pedig az, hogy a kioldóimpulzus megérkezésével egyből működteti a relét, attól függetlenül, hogy a rajta folyó áram épp milyen fázisban van. Ezen okok miatt dolgozatomban egy nem saját készítésű, hanem Durbák Norbert 2012-es szakdolgozatában [23] használt, az általa elkészített megszakító modellt vettem át. Ebben TACS vezérelt forrásokkal működtetett TRIAC-ok segítségével van megvalósítva a valósághoz hasonlóan működő megszakító. Az áramkör megszakítása mindegyik fázisban a kioldóimpulzus megérkezését követő első áram nullátmenetben történik.

4.2.5 Működés bemutatása, szimuláció

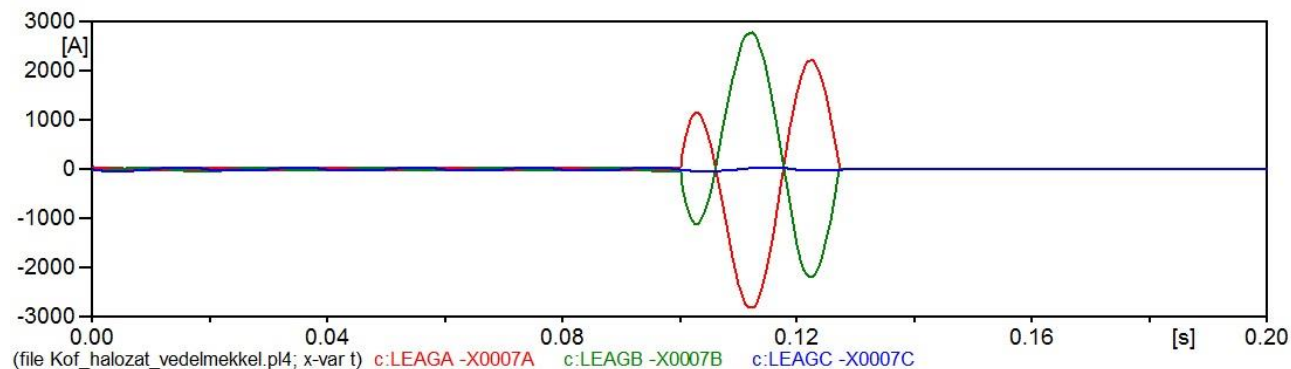
A védelmekkel kiegészítésre került közép feszültségű hálózati modell az 4-11. ábraán látható.



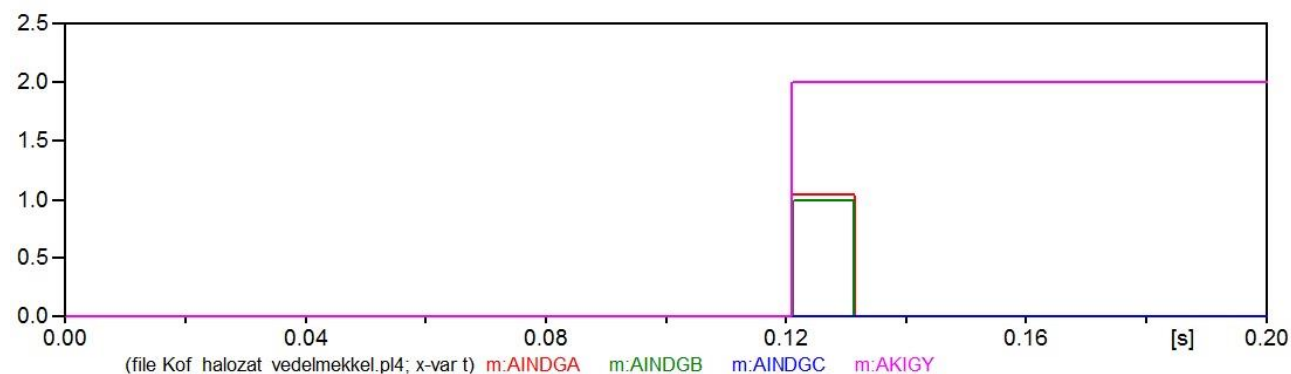
4-11. ábra: Védelmekkel kiegészített közép feszültségű hálózati modell

A hálózat és védelmeinek helyes működését két tetszőleges helyen keletkezett tartós zárlat esetére bemutatom.

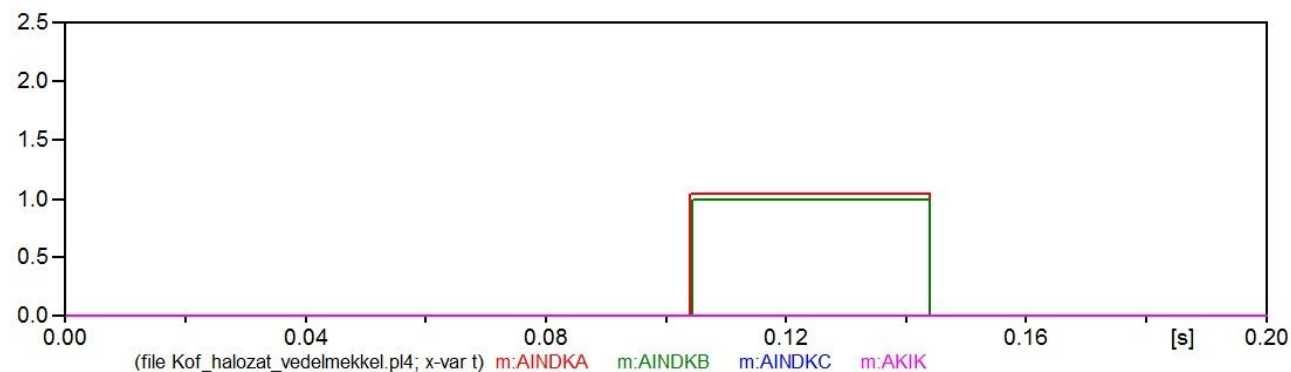
4.2.5.1 2F(AB) zárlat 0.1s-ban az egyik leágazás 5. km-e után (B pontban)



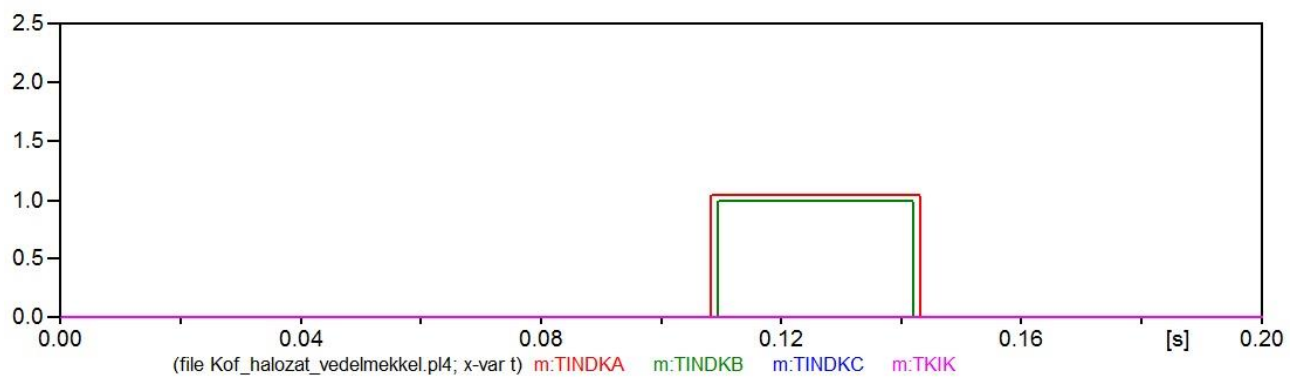
4-12. ábra: Leágazás árama B pontban történő 2F(AB) zárlat esetén



4-13. ábra: Leágazás alapvédelmének gyorsfokozat működése B pontban történő 2F(AB) zárlat esetén



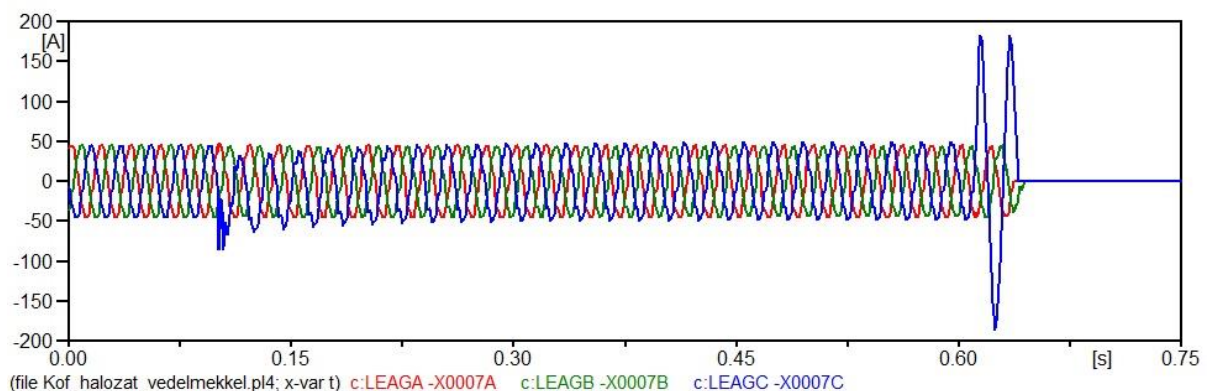
4-14. ábra: Leágazás alapvédelmének késleltett fokozatának működése B pontban történő 2F(AB) zárlat esetén



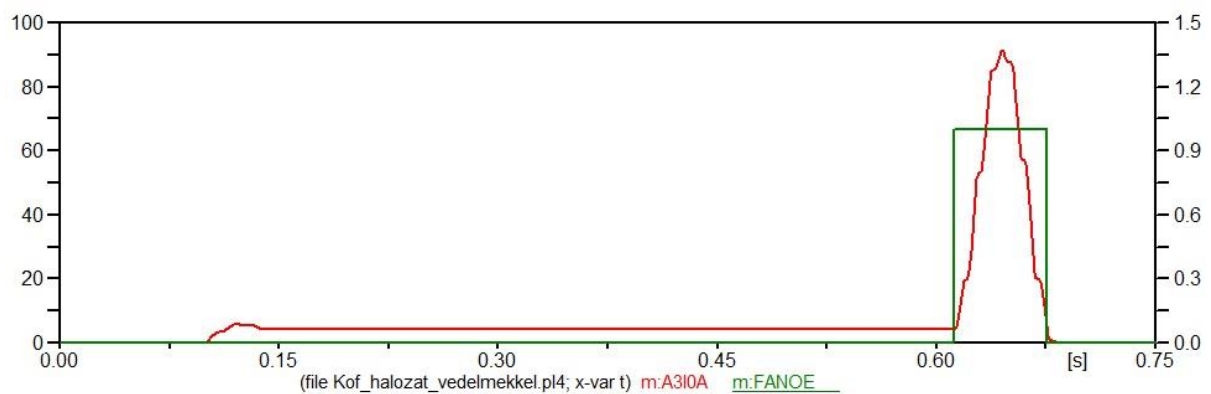
4-15. ábra: Tartalékvédelem működése B pontban történő 2F(AB) zárlat esetén

A fenti ábrákon látható a leágazás védelmeinek helyes működése. 2FN zárlat lépett fel 0.1s-ban, így A és B fázisban az áram jelentősen megnőtt (4-12. ábra). A zárlati áram alapharmonikusának effektív értéke 18ms alatt érte el a alapvédelem gyorsfokozatára beállított 1500A-t, ennek megfelelő a szimuláció 0.118. másodpercében az A és B fázisban is indult a védelem és egyben kioldási parancsot is adott (önidő miatt). A kioldási parancsot csupán szemléltetés céljából kétszeres amplitúdóval ábrázoltam (4-13. ábra). A megszakító ezután kb. 5 ms-mal az áram legközelebbi nullátmenetében kioldott, így a táplálás megszűnésével nem folyt már tovább áram a leágazáson. A zárlati áram megszűnte után további 5ms-mal visszaesett a védelem. A leágazás késleltetett fokozata és a tartalékvédelem is ébredt, azonban kioldási parancsot nem adtak késleltetésüknek megfelelően (4-14. ábra és 4-15. ábra).

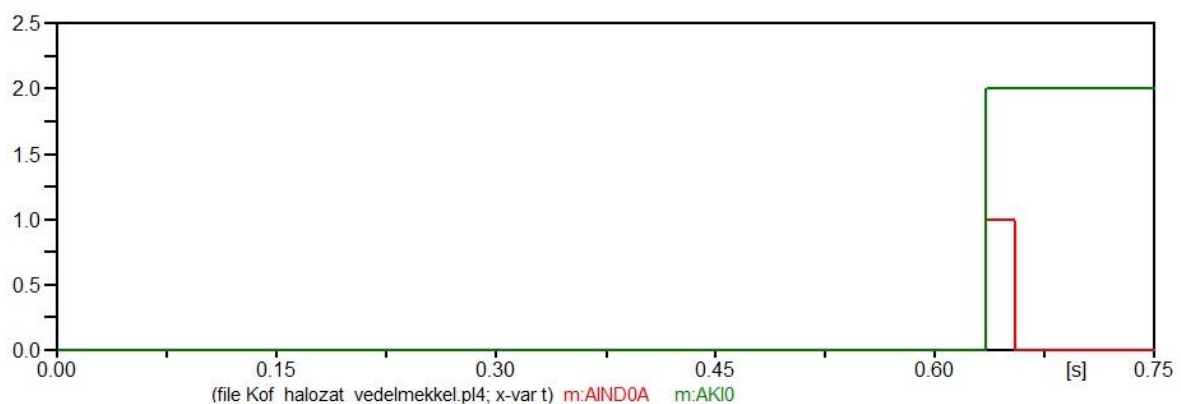
4.2.5.2 1FN (C) zárlat az egyik leágazás legtávolabbi 20kV-os feszültségű (E) pontján



4-16. ábra: Zárlatos leágazás árama E pontban történő 1FN zárlat esetén



4-17. ábra: Zérus sorrend áram (piros) és FÁNOE működése (zöld) E pontban történő 1FN zárlat esetén



4-18. ábra: Alapvédelem földzárlati áram érzékelési védelme (ébredés és kioldás) E pontban történő 1FN zárlat esetén

1FN zárlat keletkezett a C fázisban 0.1s-ban. A *Naf/Köf* transzformátor csillagpontjában a zérus sorrendű feszültség kb. 10ms alatt a beállított 9000V határértéket elérte, így indult a *FÁNOE* 500ms-os késleltetése. Mivel ez idő alatt a zérus sorrendű feszültség (vagyis az 1FN zárlat) nem szűnt meg, így a szimuláció 0.612. másodpercében a *FÁNOE* bekapcsolásra került (4-17. ábra). A megnövekedett zárlati áram ezt követően 20ms alatt érte el beállított 75A-t, így érzékelve a védelem indult és azonnal (késleltetés nélkül) kioldási parancsot adott (4-18. ábra). A megszakító a következő áram nullátmenetben megszakította az áramkört, ami után a védelem visszaesett. A 4-16. ábraán a zártos leágazás árama látható. Megfigyelhető, hogy a zárlat kialakulását követően az áram a kompenzálásnak köszönhetően nem nőtt meg jelentősen. A 4-17. ábraán látható, ahogy a *FÁNOE* bekapcsolásával a zérus sorrendű áram megnövekszik, amely a zártos leágazás áramában is követhető. Ezt érzékelve a védelem a 4-18. ábraának megfelelően kioldási parancsot adott, így csupán a zártos leágazás került leválasztásra.

4.3 Kiserőmű csatlakozásának védelmi működésekre való hatásának vizsgálata

A 4. fejezet utolsó részének kettős célja van: egyrészt bemutatom vele, hogy az elkészített középfeszültségű hálózati modell miként alkalmas kiserőművek hálózatra gyakorolt hatásainak elemzésére, másrészt néhány szcenárió ismertetésének segítségével illusztrálom, hogy a kiserőművek telepítése hogyan okozhat hibás védelmi működést.

Dolgozatomban a már korábban említett 59-es szinkron generátor modellt használtam. A generátor pontos működésében nem mélyedtem el, a névleges teljesítménye közvetlenül nem megadható, hanem a pólusfeszültség és annak a hálózati feszültséghez képesti fázishelyzetével lehet a betáplált hatásos- és meddőteljesítményt beállítani. Ennek megfelelően a generátor beállításakor e két paramétert változtattam. A kiserőmű 11kV-os feszültség szinten termel, amely egy 11/22kV-os földelt csillag-delta kapcsolású transzformátoron és 10km hosszú 95mm²-es AASC szabadvezetéken keresztül csatlakozik a hálózatra.

4.3.1 Vizsgálat előtti megfontolások

Célom hibás védelmi működések (vagy védelmi működések elmaradásának) bemutatása, így a szimulációk futtatása előtt érdemes az egyes hibák előfordulási lehetőségeinek átgondolása.

Amennyiben a kiserőmű betáplálási pontja a zárlatos hely és a mögöttes hálózat között helyezkedik el, akkor a kiserőmű által a hálózatba injektált áram (amely hiba esetén a zárlatos pont felé folyik) a zárlatos hely és a kiserőmű csatlakozási pontja közötti impedanciákon feszültségesést hoz létre. Ennek köszönhetően a generátor csatlakozási pontján adott nagyságú feszültség fennmarad, így a mögöttes hálózatból a betáplálási pont felé kisebb áram fog folyni (hiszen kisebb a közöttük lévő feszültségkülönbség), mint a generátor hálózatra való csatlakozása nélkül. Másként megfogalmazva a hálózat adott helyén bekövetkező zárlat esetén a mögöttes hálózat zárlati teljesítménye és a hálózati impedanciák által meghatározott nagyságú zárlati áram folyik. A kiserőmű által szolgáltatott villamos energia e zárlati áram egy adott részét „fedezi”, így a mögöttes hálózatból nagyságrendileg annyiival kisebb áram folyik a zárlatos pont felé, amennyi a kiserőmű által a hálózatba injektált áram. E lecsökkent áram miatt előfordulhat, hogy a védelmi berendezések nem érzékelik a zárlat létrejöttét, így nem csak védelmi rendszer szelektivitása, hanem a hálózat üzembiztonsága is veszélybe kerülhet.

1FN zárlat esetén a védelmi berendezés a zérus sorrendű áram mérése alapján hoz kioldási döntést. Feltételezve a kiserőművek szimmetrikus táplálását a földzárlat kialakulásakor a zérus sorrendű áramban nem történik változás, így a védelmek zavartalanul képesek felismerni a földzárlatot.

A kompenzálás miatt a hálózat sorrendi helyettesítőképének zérus sorrendi ágában a Petersen-tekercs által nagyimpedanciás lezárás van. Így a 2F és 2FN zárlati áramok nagysága között jelentős különbség nincsen, hiszen a sorrendi helyettesítőképek kétfázisú zárlatok esetén párhuzamosan kerülnek kapcsolásra. Emiatt az egyes eseteket elegendő a két típusú zárlat közül csak az egyikkel tesztelni, a másikkal ugyanaz az eredmény adódna. Kétfázisú zárlatból adódó hibás védelmi működés annál valószínűbben fordulhat elő, minél távolabb van a zárlat a védelmi készüléktől (illetve a mögöttes hálózattól), hiszen annál kisebb a zárlati áram, így arányaiban kis kiserőmű általi betáplálás is nagy változást okozhat a mögöttes hálózattól a zárlati pont felé haladó áram nagyságában.

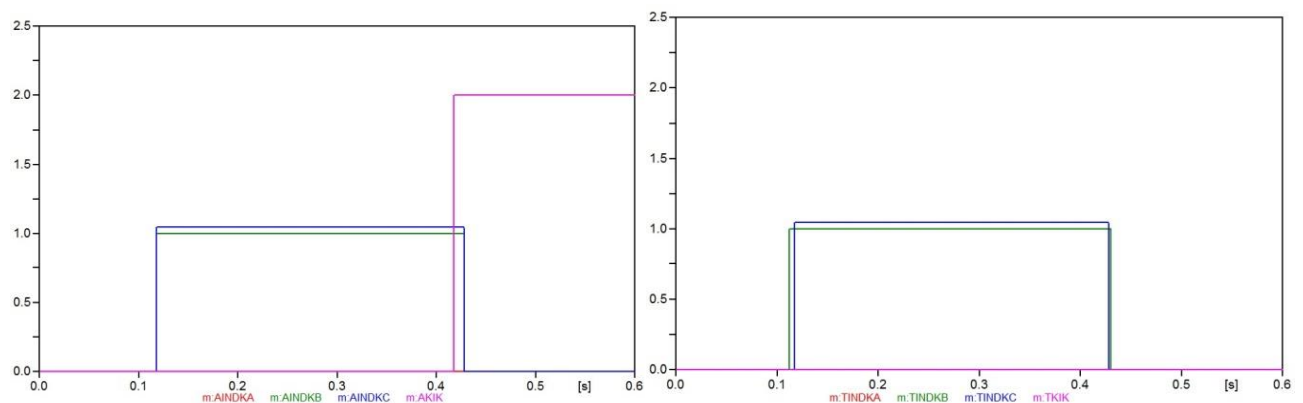
Háromfázisú zárlatok esetén kialakuló nagy zárlati áramok következtében hibás védelmi működés valószínűleg a gyorsfokozat működésében fordulhat elő, a késleltetett fokozat árambeállítása akár egy nagyságrenddel is kisebb lehet a gyorsfokozaténál. Ez alól természetesen kivétel, ha a zárlat a védelemtől nagyon távol jön létre, így a 3F zárlati áram értéke a késleltetett fokozat beállítási intervallumába kerülhet.

Hibás védelmi működésnek nem csak a fejezet előző részében általam választott beállítási értékek esetén hozott téves védelmi döntéseket tekintem, hanem minden olyan esetet, amikor hibás döntés született volna akkor, ha akármelyik, a beállítási intervallumhoz tartozó értéket választottam volna. Például az alapvédelem késleltetett fokozatának beállításakor az $168,5A \leq I_{BE}^K \leq 540A$ intervallum szerint 250A-t választottam. Azonban zárlat esetén hibás működésnek nem csak azokat az eseteket tekintem, amikor a 250A alatti áramok miatt nem szólal meg a védelem (pedig meg kellene neki), hanem azokat is, amikor 540A alatti, de 168,5A feletti áramok folynak, hiszen az intervallum beállításakor a biztonsági tényezőt is figyelembe véve olyan értékek halmazát határoztam meg, amelyek közül tetszőlegesen választva a helyes védelmi működés elvárható. Természetesen a valóságban érdemes az intervallum alsó feléről választani, hiszen az áram felfutási idejével arányosan rövidebb működési idő érhető el, illetve gyorsfokozat esetén

távolabb lát el a védelem, azonban egyes körülmények indokolhatják az intervallum felső szakaszából történő választást. Ennek megfelelően az egyes scenáriók elemzésekor a berendezések védelmi beállítását a határértékekre változtattam. Amennyiben így hibás védelmi működés történik, akkor a kiserőmű teljesítményének növelésével az eredetileg választott beállítási értékre is hibásan működne.

4.3.2 1. Szenárió: Hibás tartalékvédelmi, helyes alapvédelmi működés

Kiserőmű csatlakoztatása nélkül 0.1s-ban a villamosan legtávolabbi 20kV-os ponton (E pont) bekövetkező 2F(BC) zárlat esetén a védelmek helyesen működnek. A védelmek működését a következő 4-19. ábra szemlélteti.



4-19. ábra: Alap- (bal) és tartalékvédelmi (jobb) működés E pontban történő 2F zárlat esetén

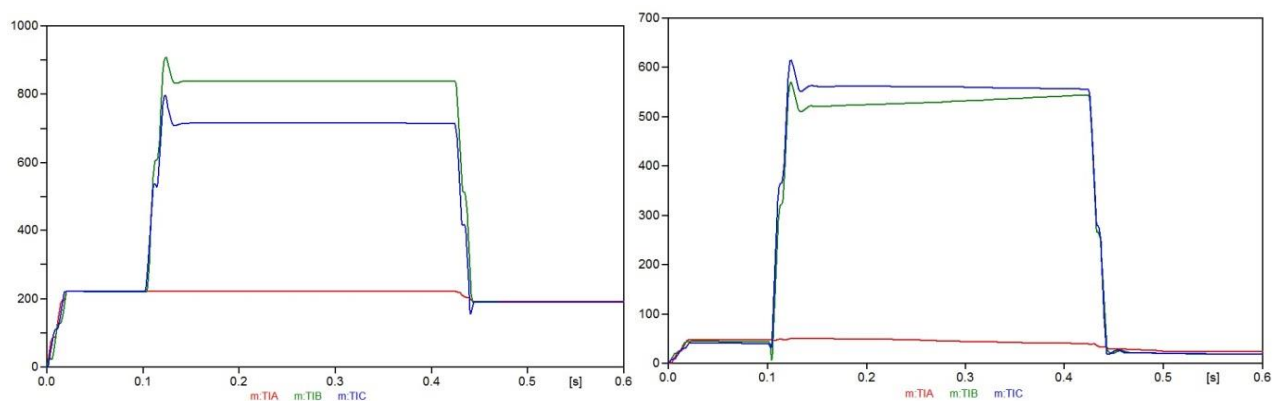
Az 4-19. ábra baloldalán ábrázoltam a zárlatos leágazás alapvédelmének késleltetett fokozatának indulását, illetve kioldóparancsát, a jobboldalán pedig a tartalékvédelem hasonló jeleit. Ábrázolás technikailag az ébredés és a kioldás jobb áttekinthetősége érdekében a kioldójelet az ábrán kétszeres amplitúdóval szemléltetem (és a továbbiakban is így fogom), illetve az egyes fázisok ébredésének megkülönböztethetősége miatt a védelem indulásának jelzéseit is néhány százalékos eltéréssel illusztrálom.

Megfigyelhető, hogy kiserőmű csatlakozása nélkül mind az alapvédelem késleltetett fokozata, mind a tartalékvédelem ébred B, C fázisban a zárlat kialakulását követően. A fokozat 300ms-os késleltetésének megfelelően az alapvédelem kioldóparancsot ad, amelynek következtében a zárlatos hálózatrész leválik, és a védelmek visszaesnek. Az alapvédelem gyorsfokozata nem indul.

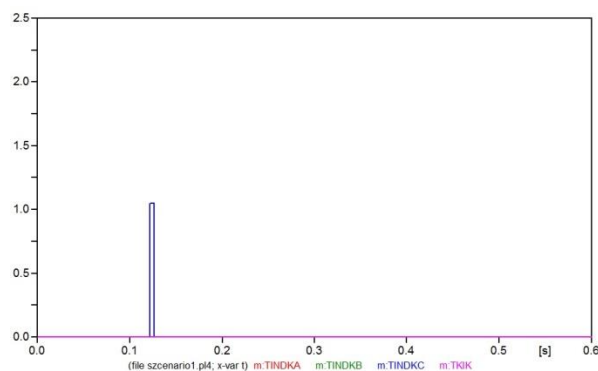
A védelem az elvártaknak megfelelően működött, a védelem beállítási értékei helyesen kerültek megválasztásra.

Ezt követően a középfeszültségű gyűjtősinre egy kiserőművet csatlakoztattam, és teljesítményének növelésével vizsgáltam a hálózatot. A generátor körülbelül 10MVA-es teljesítményénél (9,4MW és 1,9Mvar) sikerült a hibás tartalékvédelmi működést előidézni.

Az alábbi 4-20. ábraán láthatóak a tartalékvédelem által mért fázisáramok alapharmonikusának effektív értékei, amely alapján a védelem a kioldási döntést meghozza kiserőmű telepítése előtt és utáni esetre is, majd a telepítés utáni védelmi jeleket a 4-21. ábra mutatja.



4-20. ábra: Tartalékvédelem helyén folyó áramok effektív értéke kiserőmű csatlakoztatása nélkül (jobb) és csatlakozásával (bal)



4-21. ábra: 1.szcenárió: Tartalékvédelem működésének hibás elmaradása

A 4-20. ábraán megfigyelhető a tartalékvédelem helyén a kiserőmű telepítése előtti és utáni áramlási viszonyok alakulása. A generátor telepítését követően az adott teljesítmény viszonyok mellett a mögöttes hálózat felé visszatáplálás történik (hiszen látható, hogy a zárlat kialakulása után az áram effektív értéke először nulla felé mozdul el, vagyis a zárlat bekövetkeztekor megfordult az áramlási irány). A kiserőmű betáplálása miatt a mögöttes hálózat irányából kisebb

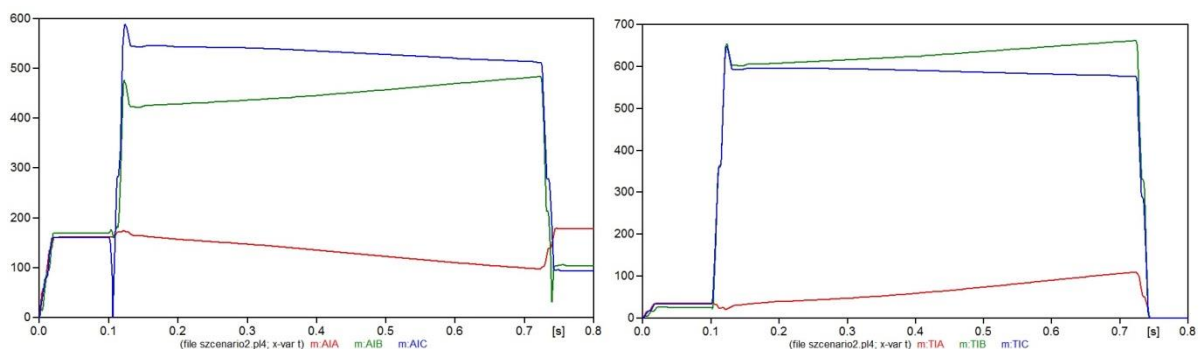
áram folyik a zárlatos pont felé, így a telepített 598A-es megszólasási áramú tartalék védelem nem ébred. A védelem hibás működése megfigyelhető a 4-21. ábraán (a zárlat létrejöttekor a kialakuló tranziens miatt egy pillanat erejéig ugyan indul a védelem, de utána egyből visszaesik). Ez a hálózat üzembiztonságát jelentős mértékben veszélyezteti, hiszen ha az alapvédelem bármilyen okból kifolyólag nem működik, a tartalékvédelem hibás működése következtében a zárlat tartósan fennmaradhat, aminek súlyos következményei lehetnek (baleset, anyagi kár, stb.).

A kiserőmű telepítése mellett a leágazások alapvédelme megfelelően működik, hiszen a leágazáson folyó áram nem függ a leágazást megelőző betáplálásoktól, csupán a leágazáson lévő terhelésektől. Ennek megfelelően azonos védelmi működés tapasztalható, mint a kiserőmű telepítése nélkül.

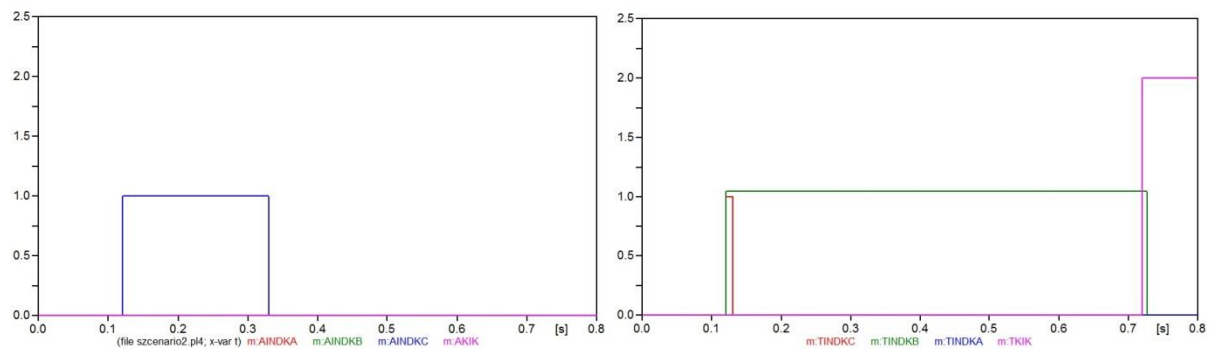
Általánosságban elmondható, hogy amennyiben a kiserőmű csatlakozási pontja a mögöttes hálózat és a zárlatos hely között van, akkor a generátor vagy elosztott energiatermelő csak a csatlakozási pontja és a mögöttes hálózat között elhelyezett védelmi berendezések helyes működésére jelent kockázatot.

4.3.3 2. Szcenárió: Helyes tartalékvédelmi, hibás alapvédelmi (késleltetett fokozat) működés

A zárlat helyén és típusán nem változtattam (2F zárlat E pontban), csak a kiserőmű telepítésének helyén. A generátort a leágazáson a gyűjtőszíntől 15km-es távolságban a C pontba (ahonnan a leválasztható szárnyvezetékek indulnak) helyeztem el, a zárlat keletkezésétől 10km-re. A kiserőmű teljesítményének növelésével a leágazás alapvédelmének hibás működését vártam. A várt kimenetel a generátor közel 10MVA-es teljesítményénél (8.7MW és 3.8Mvar) állt elő. A kapott eredmények a következő ábrákon követhetőek:



4-22. ábra: 2.szcenárió: Leágazás alapvédelme (bal) és tartalékvédelme (jobb) helyén a fázisáramok effektív értékei



4-23. ábra: 2.szcenárió: Alapvédelem késleltett fokozatának (bal) és tartalékvédelem (jobb) működési jelei (ébredés, kioldás)

Az 4-22. ábra baloldalán az alapvédelem által mért áramokat (három fázisáram) és védelmi jeleit, míg jobboldalán az tartalékvédelem hasonló értékeit ábrázoltam. Megfigyelhető, hogy a zárlat kialakulása előtt a hálózatrész teljesítményigényével összemérhető táplálás történik a leágazás egy pontján a leágazásból kifelé folyó áram nagyságából következően. Ennek megfelelően a mögöttes hálózatról igen kis teljesítmény áramlik a hálózatrész felé. A generátor nagy meddőtermelése csupán azért volt szükséges, hogy a meddőigényt ne a mögöttes hálózat fedezze, ezáltal csökkentve a mögöttes hálózat irányából folyó áramokat.

Zárlat kialakulásakor a leágazás áramiránya megváltozik, és a zárlati áram a mögöttes hálózat és a kiserőmű táplálásából tevődik össze, amelynek csak a mögöttes hálózatról áramló összetevője folyik át a leágazás alapvédelmén. E lecsökkent áram nem elegendően nagy a védelem késleltetett fokozatának ébredéséhez, így az hibásan nem indul. Egészen pontosan a zárlat kialakulásakor a védelem ugyan ébred, de 300ms-os késleltetése alatt a generátor villamos teljesítményének növekedése miatt (mechanikai teljesítményének, vagyis a frekvenciájának csökkenése révén) az áram a megszólalási érték alá csökken, így a védelem visszaesik.

Az alapvédelem gyorsfokozata helyesen nem indul, hiszen a zárlati áram nem elegendően nagy az ébredéséhez, ez a védelem eredeti beállításakor figyelembe vett szempontoknak megfelel.

A kiserőmű teljesítménye nem elegendően nagy ahhoz, hogy az általa hálózatba injektált áram a tartalékvédelem működését is megzavarja, így az a helyes beállításának megfelelően a 2F zárlat létrejöttét követően ébred, és a beállított 600ms-os késleltetés után kioldási parancsot ad. Ezáltal a tartalékvédelem funkcióját ellátva leválasztotta a zárlatos hálózatrészt, ugyanakkor a hibás alapvédelmi működésnek köszönhetően a szelektív zárathárítás nem teljesült.

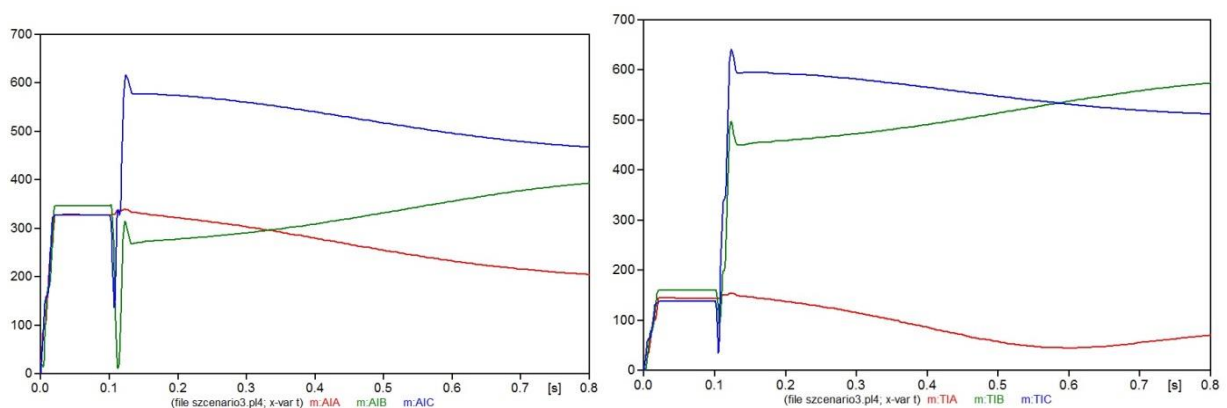
Az alapvédelem késleltetett fokozatának hibás működése azért következhetett be, mert a védelmi készülék a mögöttes hálózat és a kiserőmű betáplálási helye között helyezkedik el.

Fontos megjegyezni, hogy amennyiben a tartalékvédelem helyes működésének köszönhetően leválasztotta a zárlatos hálózatrészt, a zárlat nem került megszüntetésre, hiszen a kiserőmű továbbra is táplálja a zárlati áramot. Többek között ilyen esetek miatt is a kiserőműnek kötelezően le kell válnia a hálózatról (a megfelelő zárlati áthidalást követően) elkerülve a szigetüzemi táplálást.

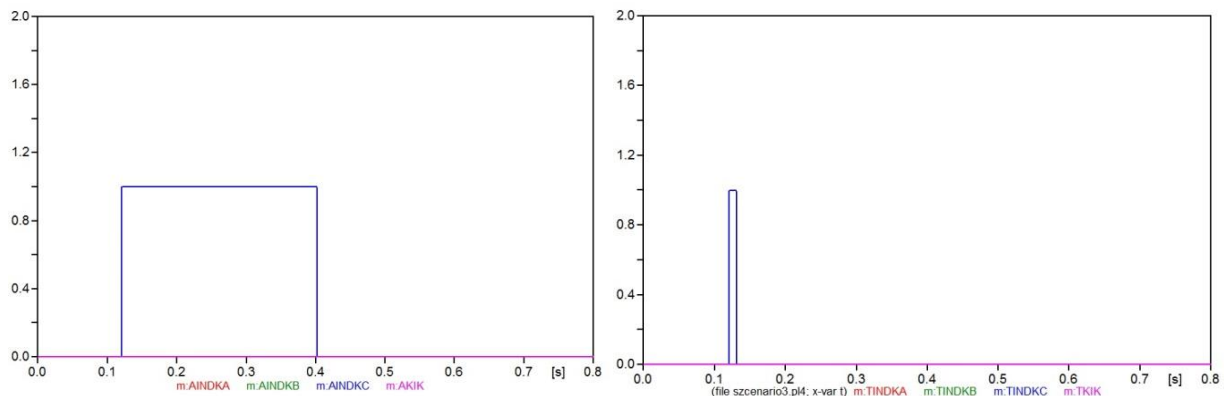
4.3.4 3. Szcenárió: Hibás tartalékvédelmi és hibás alapvédelmi (késleltetett fokozat) működés

A 2. szcenárióban tapasztaltak előrevetítették, hogy amennyiben a kiserőmű teljesítményét tovább növelem, akkor nem csak a leágazás késleltetett fokozata fog hibásan nem működni, hanem a tartalékvédelem sem fogja a zárlatot érzékelni, így a lehető legveszélyesebb eset állhat elő: nem történik meg a zárlathárítás.

Ezen megfontolásból a generátor teljesítményét tovább növelve vizsgáltam a védelmi működéseket. A kiserőmű közel 18MVA-es teljesítményénél (17,5MW és 5,8Mvar) következett be a várt jelenség. A generátor nagy meddőtermelése megint csak azt a célt szolgálja, hogy a meddőigényt ne a mögöttes hálózat fedezze, így csökkentve az onnan folyó áramok nagyságát. A valóságban ezt meddőteljesítmény kompenzációval, nem pedig a generátor túlterjesztésével valósítanak meg. Az alapvédelem és tartalékvédelem által mért áram értékek és védelmi jelek a következő ábrákon láthatóak:



4-24. ábra: 3.szcenárió: Alapvédelem (bal) és tartalékvédelem (jobb) helyén mérhető fázisáramok effektív értékei



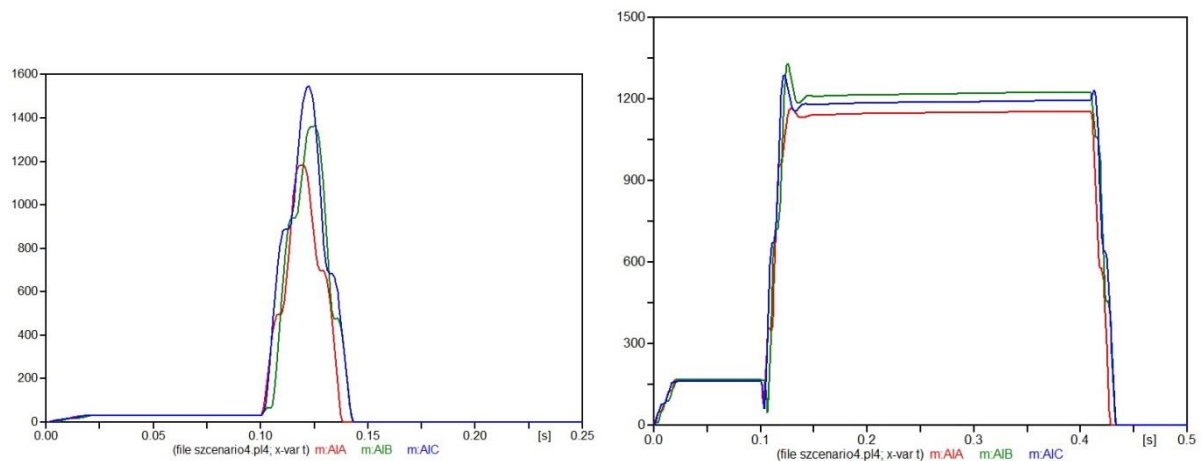
4-25. ábra: 3.szcenárió: Alapvédelem késleltetett fokozatának (bal) és a tartalékvédelem (jobb) működése

A 4-24. ábra és a 4-25. ábra baloldalán a zárlatos leágazás alapvédelmének helyén mért áram értékek és védelmi jelei láthatóak, míg jobb oldalon a tartalékvédelem azonos mennyiségei.

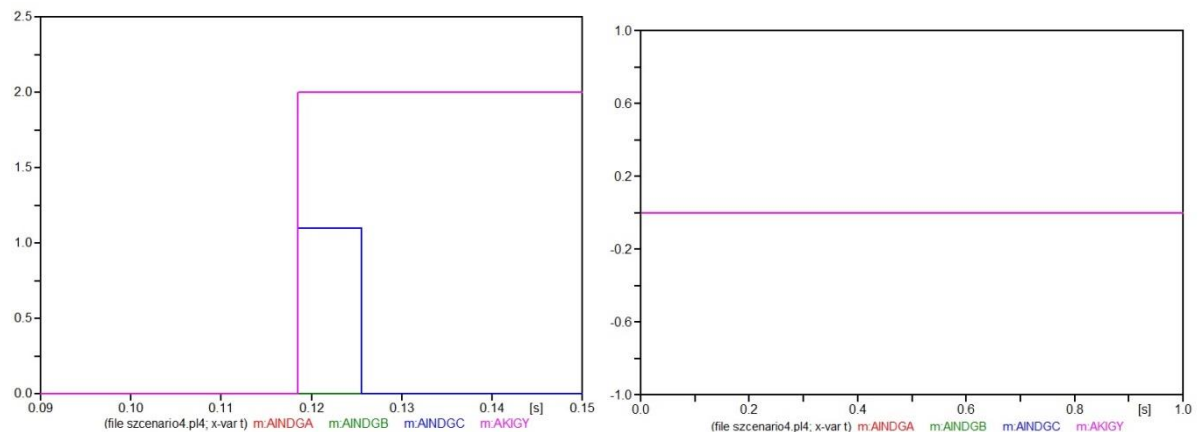
A zárlatot megelőzően a leágazáson közel 350A effektív értékű áram folyik a közép feszültségű gyűjtősin irányába, ebből 200A a többi leágazás fogyasztási igényét fedezi, és közel 150A folyik a mögöttes hálózatba. A zárlat kialakulása következtében az előző szcenárióhoz hasonlóan megfordul a leágazáson az áram iránya. Zárlat alatt az áramban tapasztalható lengés a generátor lengésének következménye. Megfigyelhető, hogy az alapvédelem késleltetett fokozata az előző szcenárióban tapasztaltakhoz hasonlóan ébred, azonban 300ms-os késleltetése alatt a leágazáson folyó áram a beállított megszólalási érték alá csökken, így 0.4s-ban visszaesik.

A kiserőmű nagy teljesítményének köszönhetően a hálózatba injektált áram elegendően nagy ahhoz, hogy a tartalékvédelem megszólalási értéke alatti áram folyjon a mögöttes hálózaton keresztül a zárlatos pont felé, így a védelem ébredése elmarad (egészen pontosan a zárlat következtében keletkező tranziens miatt ébred a védelem, de egyből vissza is esik), és nem történik meg a zárlatra való táplálás megszüntetése.

Az alapvédelmi és egyszerre a tartalékvédelmi működések elmaradása a hálózat szempontjából az egyik legsúlyosabb hibának számít, emiatt a hagyományos védelmi rendszerekkel felszerelt közép feszültségű hálózatra csatlakozó kiserőművek telepítését korlátozni szükséges, hiszen a jelenség előfordulási valószínűsége a telepített generátorok számának (így teljesítményük) növekedésével fokozatosan emelkedik.



4-26. ábra: 4.szcenárió: Leágazás áramának alakulása kiserőmű telepítése nélkül (bal) és kiserőmű telepítésével (jobb)

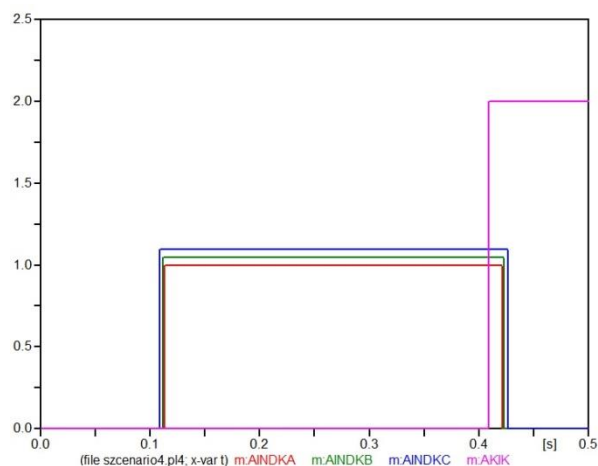


4-27. ábra: 4.szcenárió: Leágazás alapvédelmének gyorsfokozati működései kiserőmű telepítése (bal) előtt és után (jobb)

A 4-26. ábra és a 4-27. ábra baloldalán a kiserőmű telepítése előtti áramviszonyok és védelmi működések figyelhetők meg a zártas leágazás alapvédelmének helyén. Látható, hogy amint az A fázis elérte az 1369A-es beállított megszólalási értéket, azonnal ébred és kioldási parancsot ad. Ennek következtében a megszakító kikapcsol és a zártas hálózatrész leválasztásra kerül.

A 4-26. ábra és a 4-27. ábra jobboldalán láthatóak az áramviszonyok, illetve a gyorsfokozat indulásának hiánya a kiserőmű telepítését követően.

A késleltetett fokozat természetesen indult és 300ms-os késleltetését követően kioldási parancsot adott, és a leágazás megszakítója kikapcsolt. A késleltetett fokozat védelmének működése a következő ábrán látható:



4-28. ábra: 4.szcenárió: Alapvédelem késleltetett fokozatának működése (ébredés és kioldás)

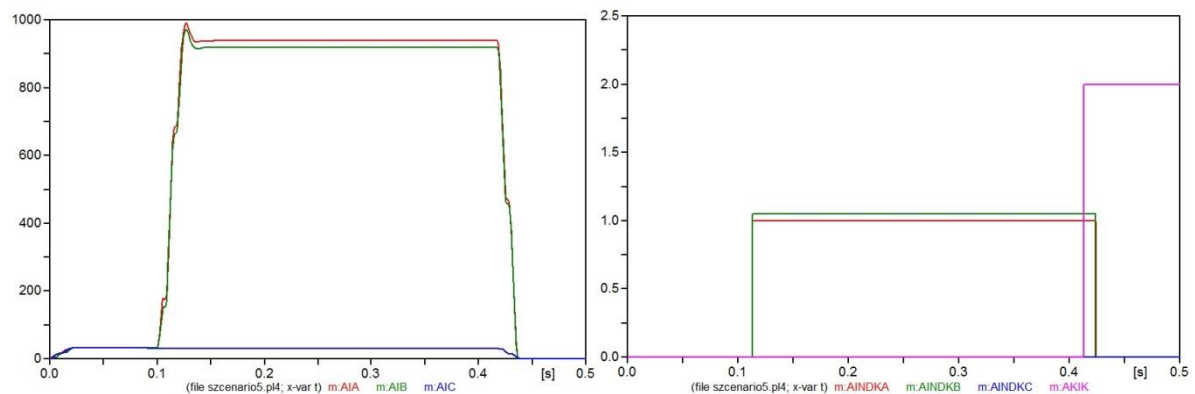
Amennyiben a tévesen elmaradó védelmi működések a hiba súlyossága szerint kellene értékelni, akkor a gyorsfokozat indulásának elmaradása a késleltetett fokozatával szemben enyhébb hibának számítana, hiszen a zárlathárítás várhatóan akkor is megtörténik, csak nagyobb késleltetéssel (hacsak a generátor által betáplált teljesítmény elegendően nagy ahhoz is, hogy a késleltetett fokozat se érzékelje a zárlat létrejöttét, de ha a gyorsfokozat megszólalását várjuk, akkor ez extrém esetnek minősíthető).

4.3.6 5. Szcenárió: Helyes védelmi működések: zárlat a mögöttes hálózat és a kiserőmű között

A kiserőmű és a zárlati hely mögöttes hálózathoz viszonyított relatív pozíciójának felcserélésekor vizsgáltam, hogy vajon előfordulhat-e ilyen esetben is hibás védelmi működés. Az előzetes várakozás az, hogy nem, hiszen a védelem által a hálózatba injektált áram zárlat esetén (amennyiben a zárlati hely a mögöttes hálózat és a kiserőmű között alakul ki) a zárlati ponton keresztül záródik, így a mögöttes hálózat irányába nem folyik a kiserőmű felől áram. Ennek következtében a mögöttes hálózat és a zárlati hely között nem történik általa feszültségesés, vagyis zárlat alatt az ottani feszültség szintjére a generátornak nincs ráhatása. Ez azt jelenti, hogy a kiserőmű ilyen elhelyezkedése esetén a zárlatra csupán rátáplál, vagyis a zárlati áram értéke meg fog nőni a kiserőmű áramának megfelelően, de a mögöttes hálózat áramában nem fog változás történni a kiserőmű telepítése nélküli hasonló szituációhoz képest.

A megfontolás igazolására a kiserőművet egy leágazás legtávolabbi 20kV-os pontjára (E pont) helyeztem el, 2F(AB) zárlatot pedig a kiserőmű és a mögöttes hálózat között, a leválasztható

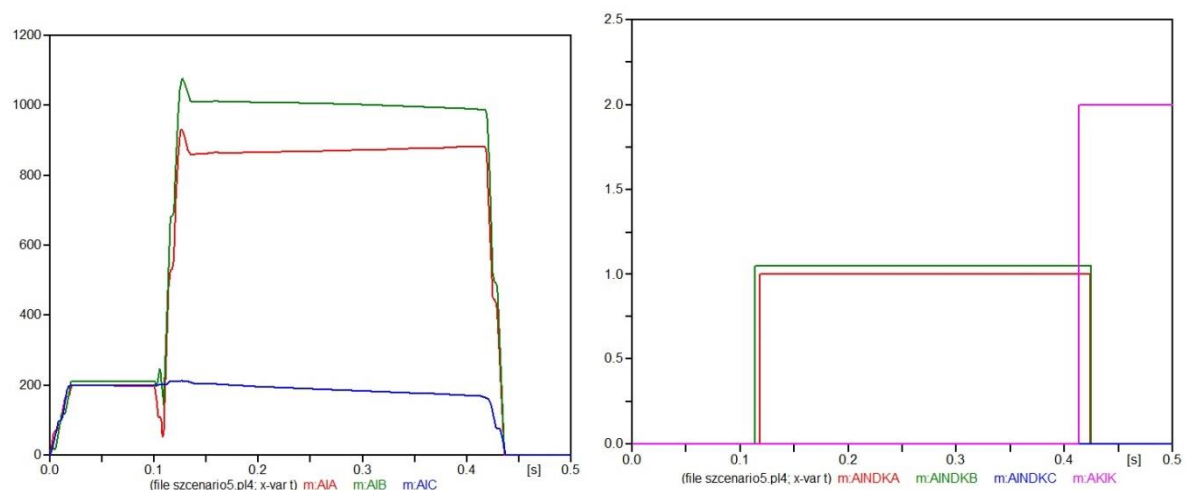
szárnyvezetékek csatlakozási pontjánál (C pont) képeztem. A generátor telepítése előtti állapotok a következő 4-29. ábraán követhetőek nyomon:



4-29. ábra: 5. szcenárió: leágazás alapvédelme által mért áramok és működési jelei kiserőmű telepítése előtt

A leágazáson hibamentes állapotban közel 30A áram folyik a fogyasztók irányába. A 0.1s-ban bekövetkező 2F zárlat miatt az A és B fázis áramai 900A felé emelkednek, így indul a leágazás alapvédelmének alapfokozata és 300ms után indítja a megszakítót.

Egy közel 11MVA teljesítményű kiserőmű F pontba való bekapcsolásakor az alapvédelem helyén folyó áramok effektív értéke és védelmi jelei az alábbi 4-30. ábraán láthatók:



4-30. ábra: 5. szcenárió: leágazás alapvédelme által mért áramok és működési jelei kiserőmű telepítése után

Megfigyelhető, hogy a késleltetett fokozat a generátor telepítése nélküli állapotokkal megegyezően ébred és kioldási parancsot ad. A leágazás áramának effektív értéke a zárlat kialakulását megelőzően 200A nagyságrendű a kiserőmű táplálásának köszönhetően (a közép feszültségű gyűjtősin irányába). A zárlat kialakulásakor a zárlati áramok a zárlatos fázisokban

ellentétes irányból indulnak meg, így az üzemi áramokhoz ellentétes előjellel adódnak hozzá. Ennek köszönhető az egyes fázisok áramainak effektív értékében látható aszimmetria. Vagyis minél nagyobb a generátor teljesítménye, annál nagyobb lesz a zárlatos fázisáramok effektív értékének eltérése, de a kiserőmű telepítése előtti zárlati fázisáramokhoz képest szimmetrikusan változnak, így a kettő közül az egyik fázisban mindenféleképpen ébredni fog a védelem.

A generátor teljesítményének növelésével csupán az aszimmetria mértéke változott, illetve a zárlati áram nőtt, de a védelmek mindig helyesen kioldási parancsot adtak, ami igazolta a szimuláció előtti megfontolást.

4.3.7 További vizsgálati lehetőségek

A fentebb bemutatott öt scenárión kívül a kiserőmű és a zárlati hely (és típus) megválasztásának rengeteg egyéb variációja lehetséges, így természetesen az általam végzett vizsgálat nem teljes körű, azonban rávilágít az egyes védelmi működések hibás elmaradásának lehetséges okaira, és bemutatja, hogy az általam elkészített hálózat miként alkalmas kiserőművek védelmekre gyakorolt hatásainak elemzésére.

Az ismertetett scenáriókon kívül a modell maga sokkal több vizsgálat elvégzésére ad lehetőséget, amivel az egyes hibás védelmi működések előfordulásai vizsgálhatók, de ezekre a diplomaterv keretei között a dolgozat terjedelmi korlátai miatt már nem került sor.

A közép feszültségű hálózati modellel többek között az alább felsorolt további vizsgálatok lehetségesek a teljesség igénye nélkül:

- gyűjtőszínről induló leágazások számának növelése
- egy leágazáson lévő távvezetékek hosszának növelése
- harmonikus kibocsátás növelése és fázisának változtatása
- sok kisebb erőmű telepítése
- kiserőmű másik leágazás védelmére gyakorolt hatásának vizsgálata

5 Szigetüzem elleni védelmek ATPDraw-ban történő megvalósítása

A dolgozatom előző, 4. fejezetében azt vizsgáltam, hogy a középfeszültségű hálózatra telepített kiserőművek milyen hatást gyakorolnak magára a hálózatra, illetve annak védelmi készülékeire. Ebben a fejezetben a hálózat hatását mutatom be a kiserőműre, egészen pontosan azt, hogy a kiserőmű csatlakozási pontján mintavételezett villamos jelekből hogyan képes a generátor védelme megállapítani azt, hogy a mögöttes hálózat betáplálása valamilyen oknál fogva megszűnt, így a termelő a hálózat egyéb elemeivel szigetüzembe került.

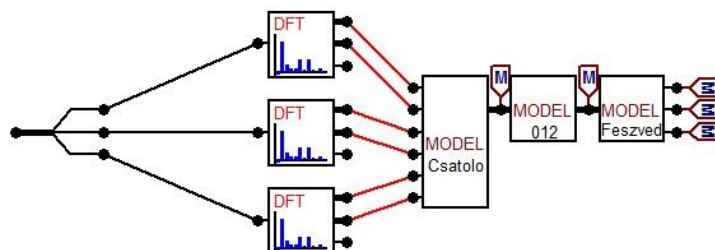
Ahogy a dolgozatom 2. fejezetében is említettem, a szigetüzem tartósan nem tartható fent, a lehető leggyorsabban fel kell ismernie a generátor védelmi készülékének, és a csatlakozási pontra szerelt megszakítót működtetve meg kell szakítani a szigetben lévő hálózatrész táplálását. Ez fontos akkor is, ha a mögöttes hálózat éppen azért vált le, mert az utólag szigetüzembe került hálózatrészen zárlat következett be, így a védelmek helyesen kioldóparancsot adtak. Előfordulhat, hogy a mögöttes hálózat leválásával a zárlati áramkör nem szakad meg a generátor táplálása miatt, így a zárlat nem szűnik meg, ami az egyes berendezések károsodásával járhat, nagy áramok miatt esetleges balesetek történhetnek, illetve a visszakapcsoló automatika által indított mögöttes hálózat visszakapcsolása sikertelen lesz, így a fogyasztók tovább maradhatnak villamos energia nélkül.

Ugyanakkor meg kell említeni, hogy épp a decentralizált energiatermelők térnyerése következtében előfordulhat, hogy zárlat esetén olyan sok kiserőmű válna le a hálózatról, hogy az veszélyeztetné a feszültségstabilitást. Emiatt a kiserőművek zárlat esetén történő leválását szabályozni szükséges. A zárlati áthidaló képesség (*FRT- Fault Ride Through*) előírás meghatározza, hogy adott típusú zárlat esetén a feszültségcsökkenés mértékének függvényében mennyi ideig kötelező a kiserőműnek a hálózaton maradnia. Magyarországon az *FRT* karakterisztika alapján bármilyen zárlat esetén, ha a feszültség a névleges értékének 90%-a alá csökken, akkor a maximálisan előforduló áthidalási idő 1.5s, a feszültség névleges értékének 90%-a felett pedig nem szabad a hálózatról leválnia. [24]

A dolgozat e fejezetében először a gyártók digitális védelmeiben is megtalálható feszültség- és frekvenciamérésen alapuló védelmi funkciók ATPDraw-ban történő *MODELS* nyelven általam megvalósított modelljeit mutatom be, ezt követően az előző fejezetben előállított hálózati

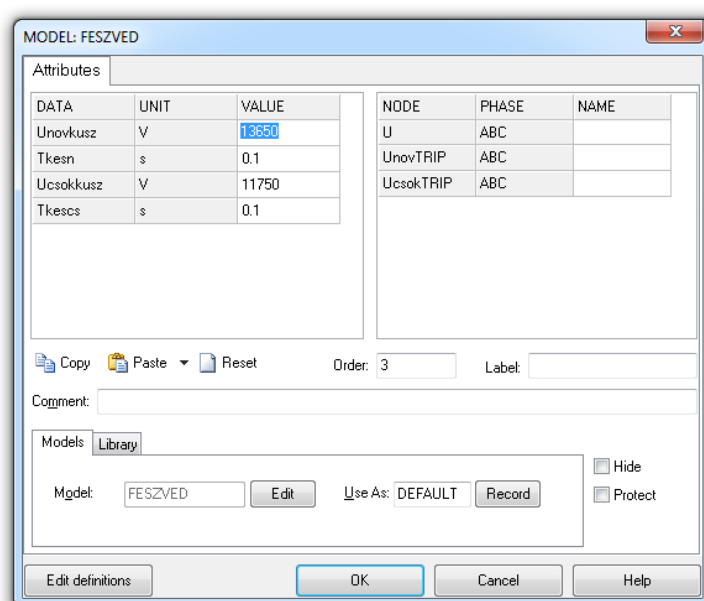
modellen tesztetem a csatlakozási ponton mért villamos jelek segítségével a védelmi funkciók helyes működését.

5.1 Feszültségmérésen alapuló szigetüzem érzékelési funkciók



5-1. ábra: Feszültségemelkedési és csökkenési védelem megvalósítása ATPDraw-ban

A feszültségemelkedési és csökkenési védelmet egyszerűen meg lehet *MODELS* programozási nyelven valósítani. Ahogy a valós gyakorlatban is szokás, a mintavételezett jeleknek először a Fourier alapharmonikus összetevőjét képeztem mindhárom fázisra külön-külön. Ezt követően az alapharmonikus fázor amplitúdó és fázis adataiból az egyes fázisok 50Hz-es szinusz jeleit reprodukáltam (csatoló elem) azért, hogy szimmetrikus összetevőkre bontással a pozitív sorrendű komponenst előállítsam, amely alapján a védelmi logika a kioldásról dönt. A leprogramozott *MODELS* elem ezt összehasonlítja egy előre beállítható megszólalási határértékkel, és amennyiben a feszültség nem a megengedett intervallumban van, akkor indít egy számlálót, amely egy előre beállítható késleltetést követően kioldójelet ad.



5-2. ábra: Feszültségvédelem beszédpanelje ATPDraw-ban

5.2 Frekvenciamérésen alapuló szigetüzem érzékelési funkciók

A frekvenciamérésen alapuló védelemek *ATPDraw*-ban történő leképezéséhez először a hálózati frekvenciát pontosan mérő elemet szükséges megvalósítani. Ugyan az *ATPDraw* elemkészletében található frekvenciamérő elem, azonban az *TACS* nyelven került megírásra, így pontos működési elve nem látható, illetve a védelmi funkciók ellátásához szükséges módosítások sem végezhetők el rajta.

Ennek megfelelően elkészítettem *MODELS* nyelven a frekvenciamérő elemet, amely a kiszámolt frekvencia alapján meghatározza a frekvencia gradiens nagyságát, illetve a vektorugrás szögét is. Alább látható az értékek számításának programkódban történő megvalósítása:

```
--Elso nullátmenet meghatározása (ha eddig még nem volt pozitív nullátmenet, de most épp van)
  IF t_prev[i]=-1 AND Uprev[i]<=0 AND U[i]>=0
  THEN t_prev[i]:=backtime(U[i],0)          --legelső nullátmenet időpontja
--Frekvenciamérés
  ELSE IF Uprev[i]<=0 AND U[i]>=0 THEN          --ha épp pozitív nullátmenet van
    t_atm[i]:=backtime(U[i],0)                --aktuális nullátmenet időpontja
    T_akt[i]:=t_atm[i]-t_prev[i]              --aktuális periódusidő
    FREQ[i]:=1/T_akt[i]                      --aktuális frekvencia
--Frekvencia gradiens: frekvenciaváltozás sebessége (aktuális periódusidőhöz viszonyítva)
    Grad[i]:=(FREQ[i]-freq_prev[i])/T_akt[i]
--Vektorugrás
    Fi[i]:=(T_akt[i]-1/freq_prev[i])*f*360    --vektorugrás szöge
```

U[i]	i. fázis aktuális mintavételének feszültségértéke	T_akt[i]	i. fázis aktuális periódusideje
Uprev[i]	i. fázis előző mintavételének feszültségértéke	FREQ[i]	i. fázis aktuális frekvenciája
t_prev[i]	i. fázis előző nullátmenet időpontja	Grad[i]	i. fázis aktuális frekvencia gradiense
freq_prev[i]	i. fázis előző periódusának frekvenciája	Fi[i]	i. fázis aktuális vektorugrásának szöge
t_atm[i]	i. fázis aktuális pozitív nullátmenetének időpontja		

Az elkészített védelmi logika a mért villamos jelek segítségével kiszámított frekvencia, gradiens és vektorugrás értékeket egy előre beállítható megszólalási értékkel hasonlítja össze, és amennyiben egy előre megadható késleltetés idejéig fennáll a határérték túllépés, akkor a védelem kioldási parancsot ad.

A védelmi logika frekvenciacsökkenési, emelkedési és gradiens védelem esetében azonos felépítésű, így csak a frekvenciacsökkenési védelem *MODELS* nyelven történő megvalósítását ábrázolom, a másik két védelmi logikát is hasonlóképpen programoztam, csupán más változónevekkel.

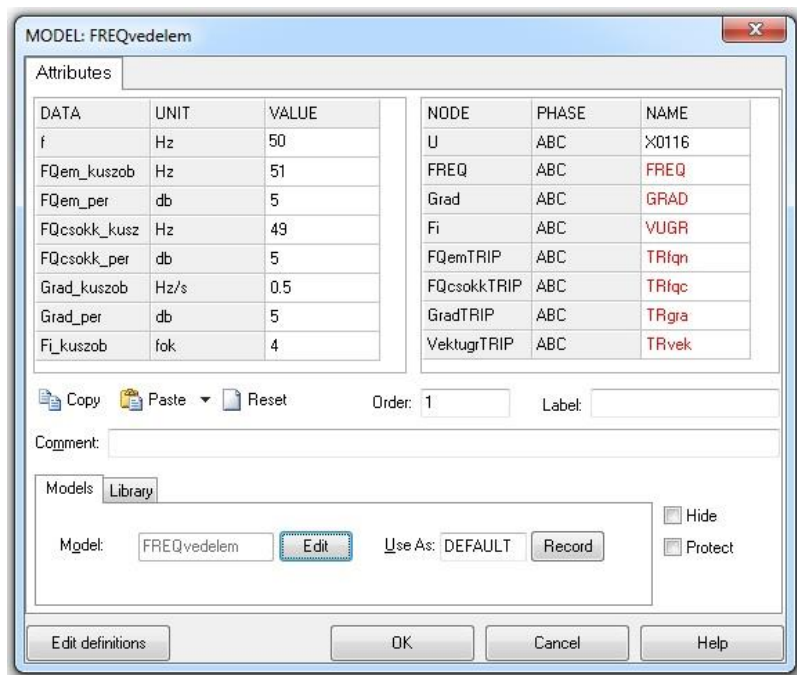
```
--Frekvenciacsökkenési védelem
IF FREQ[i]<=FQcsokk_kusz          --ha a frekvencia határérték alatt van
THEN FQcsokkszaml[i]:=FQcsokkszaml[i]+1  --számlálót eggyel növeli
ELSE IF FQcsokkszaml[i]>0
THEN FQcsokkszaml[i]:=FQcsokkszaml[i]-1 --egyébként: ha számláló nem 0, akkor csökkenti
ENDIF
ENDIF

IF FQcsokkszaml[i]=FQcsokk_per      --ha a számláló eléri a beállított értéket
THEN FQcsokkTRIP[i]:=1              --kioldási parancs
ENDIF
```

FREQ[i]	i. fázis aktuális frekvenciája
FQcsokk_kusz	frekvencia csökkenési védelem megszólalási értéke
FQcsokk_per	frekvencia csökkenési védelem megszólalásához szükséges határértéket túllépő periódusok száma
FQcsokkszaml[i]	i. fázishatárérték túllépő periódusainak száma
FQcsokkTRIP[i]	i. fázis frekvencia csökkenési védelmének kioldási parancsa

Fontos megjegyezni, hogy e védelmi funkciók esetében a késleltetés másképpen állítható be, mint a feszültségmérésen alapuló védelmeknél, hiszen a frekvencia és így a gradiens értéke is csak periódusonként változhat (a periódusidő pedig folyamatosan változhat), emiatt nem lenne értelme idő alapú késleltetést megadni. A valós folyamatokat jobban tükrözve a késleltetést az adott határértéket túllépő periódusok számának megadásával lehet beállítani.

A vektorugrás védelem döntési logikája az előzőeknél némileg egyszerűbb, hiszen pillanatműködésű, így nem indul számláló határérték túllépéskor, hanem a funkció azonnal kioldóparancsot ad.



5-3. ábra: Frekvenciamérésen alapuló védelmek beállítási beszédpanelje

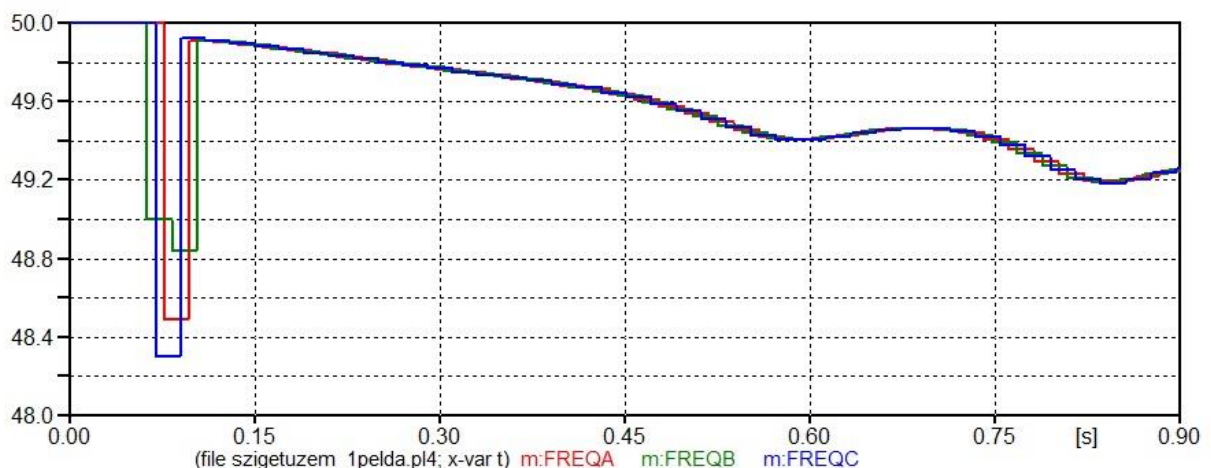
5.3 A szigetüzem elleni védelmek működésének bemutatása

A fejezet e részében két különböző példán keresztül mutatom be az egyes funkciók helyes működését. A példák bemutatására az előző fejezetben ismertetett középfeszültségű hálózati modellt használom. A kiserőmű védelmét a generátor 22kV-os oldalára telepítettem.

1. Példa: 3MW ($\cos\varphi=1$) teljesítményt szolgáltató kiserőmű csatlakozik a középfeszültségű gyűjtősinre (GYSIN), és a mögöttes hálózat leválásával 0.55s-ban szigetüzembe kerül.

A generátornak szigetüzembe kerüléskor egyedül kell ellátnia a betáplálásánál nagyobb hatásos és meddő teljesítményigényű fogyasztókat, ez pedig csak úgy valósulhat meg, hogy a hálózati frekvencia és a feszültség szint is csökkenésnek indul.

A hálózati frekvencia alakulásának vizsgálatakor nem várt eredmény adódott, amelyet a következő 5-4. ábraán mutatok be:

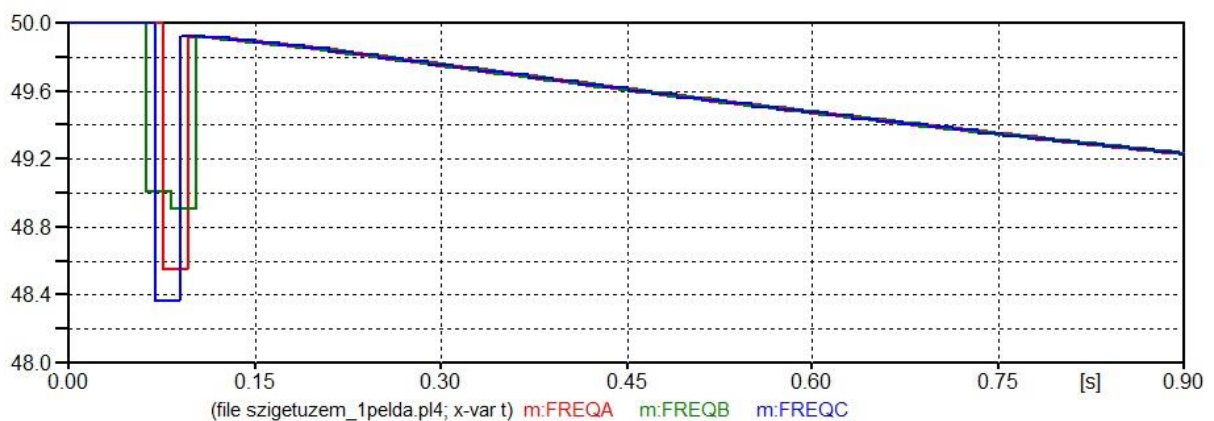


5-4. ábra: 1.példa: Hálózati frekvencia alakulása harmonikus temeléssel

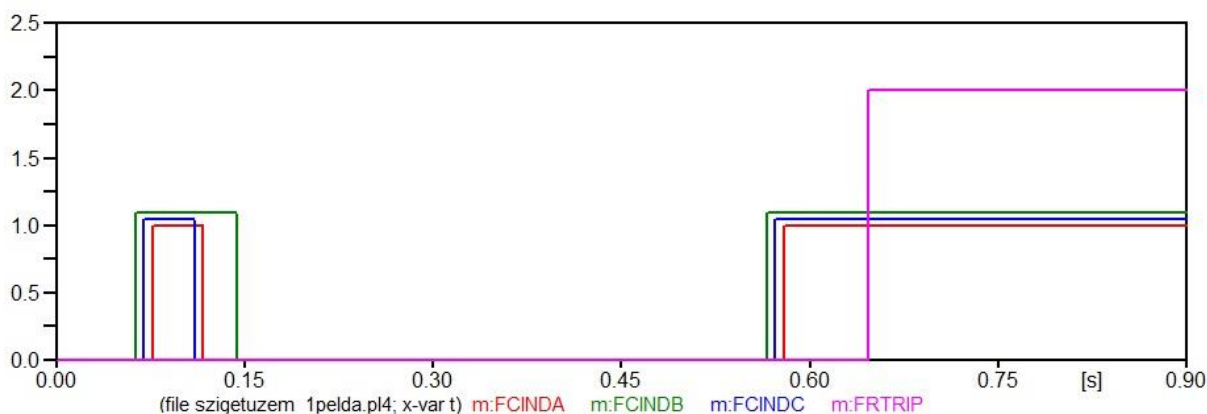
A szigetüzemben maradt hálózatrész frekvenciájának egyenletes csökkenését vártam, hiszen a generátor tengelyén lévő mechanikai teljesítmény állandó. A turbina forgási energiája biztosítja a hálózatrész megnövekedett villamos teljesítményigényét, amely által a forgórész egyenletesen lassulni kezd, és így a hálózati frekvencia egyenletesen csökkenni. A kapott eredményben azonban 0.45s után a frekvencia lengőjellegű csökkenését észleltem. Rövid gondolkodás után felismertem, hogy a jelenségért a hálózati modell felharmonikus forrásai a felelősek. E források frekvenciája a felhasználó által definiáltak és nem pedig az alapharmonikus frekvencia függvényei, ennek következtében a beállított 5. és 7. harmonikus 250 és 350Hz-es frekvenciája szigetüzem alatt

(hibásan) változatlan marad, míg az alapharmonikus 50Hz-ről indulva fokozatosan csökken. Emiatt a jelek szuperponálódása révén a felharmonikusok fázisszögétől függően a feszültség nullátmenetei eltolódnak. Ez rávilágított, hogy a hálózati modell felharmonikus forrásai csak változatlan hálózati frekvencia mellett alkalmazhatóak, ugyanis nem képesek alkalmazkodni az alapharmonikus megváltozásához. Ezen okok miatt a fejezet további részében a felharmonikus források modellezésétől eltekintek (amplitúdójukat 0-ra állítom).

A frekvenciacsökkenési védelmet alapértelmezésben 49.5Hz-es megszólalási értékre állítottam be. Az alábbi 5-5. ábra5-6. ábraákon látható a hálózati frekvencia alakulása mindhárom fázisra és a frekvenciacsökkenési védelem működése abban az esetben, ha minden más védelmi funkció tiltva van, így nem történik korábban kioldás. A védelmi jelek illusztrálására az előző fejezethez hasonlóan a kioldóparancsot kétszeres amplitúdóval jelöltem, és a fejezet további részében is ezt a jelölést használom. Ezen felül a védelem kioldójele nem működteti a megszakítót az egyes frekvencia, gradiens és vektorugrás ábrák átláthatósága végett. A leírás célja a védelmi eszközök helyes működésének dokumentálása, vagyis a megfelelő ébredés és kioldóparancs érkezése. Ideális megszakító működést feltételezve a kioldóparancs hatására minden esetben megszakadna az áramkör, az azt követő tranziens folyamatok pedig jelen vizsgálatban nem lényegesek.



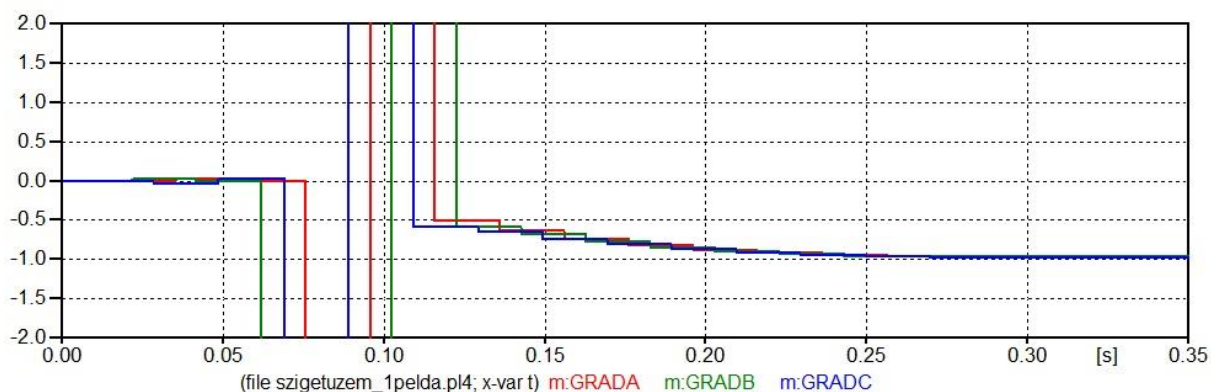
5-5. ábra: 1.példa: hálózati frekvencia alakulása



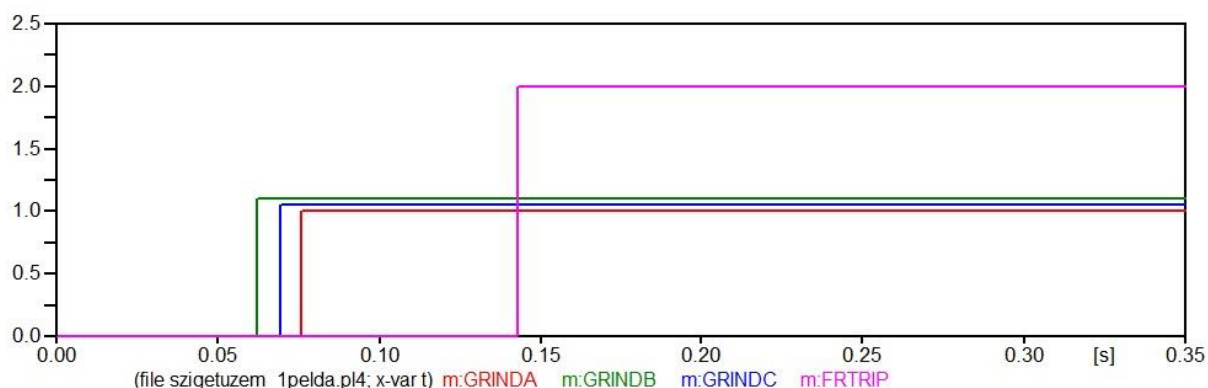
5-6. ábra: 1.példa: frekvenciacsökkenési védelem működése (ébredés és kioldás)

A hálózati frekvencia a szigetüzem kialakulását megelőzően 50Hz volt, majd a hirtelen megváltozott terhelésnek, és így a vektorugrásnak köszönhetően egy, esetleg két periódus ideig jelentősen kisebb értékű, majd ezt követően közel 50Hz-ről fokozatosan csökken. A frekvenciacsökkenési védelem először ébred a vektorugrás miatt, de helyesen visszaesik, majd ezt követően a 49.5Hz-es megszólalási értéknél újból indul, és 5 periódussal később kioldási parancsot ad. Az indulást követően azért nem közel 100ms-mal, hanem 80ms-mal történt a kioldás, hiszen az első határértéket átlépő frekvenciaérték beérkezésekor már egy periódus ideje a megadott határon kívül volt a frekvencia.

A frekvencia gradiensében is megfigyelhetők a frekvenciánál tapasztalt jelenségek, hiszen a gradiens annak értékéből került származtatásra. A gradiens védelem megszólalási értékét a 0.5Hz/s-os alapértelmezett értékén hagytam. Az alábbi 5-7. ábra5-8. ábraákon az egyes fázisok gradiensének változását és a védelmi funkció jeleit illusztráltam, abban az esetben, ha a komplex védelem minden más funkciója tiltva van.



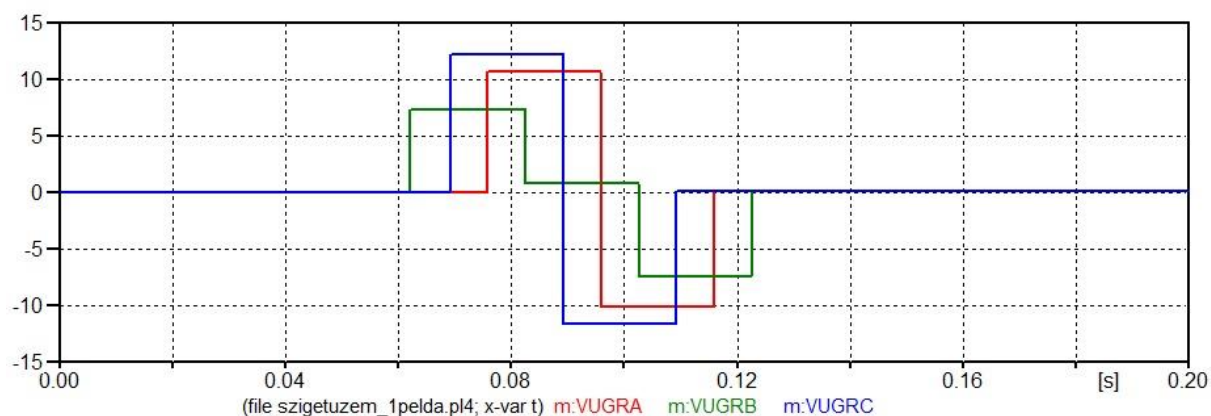
5-7. ábra: 1.példa: Frekvencia gradiens alakulása



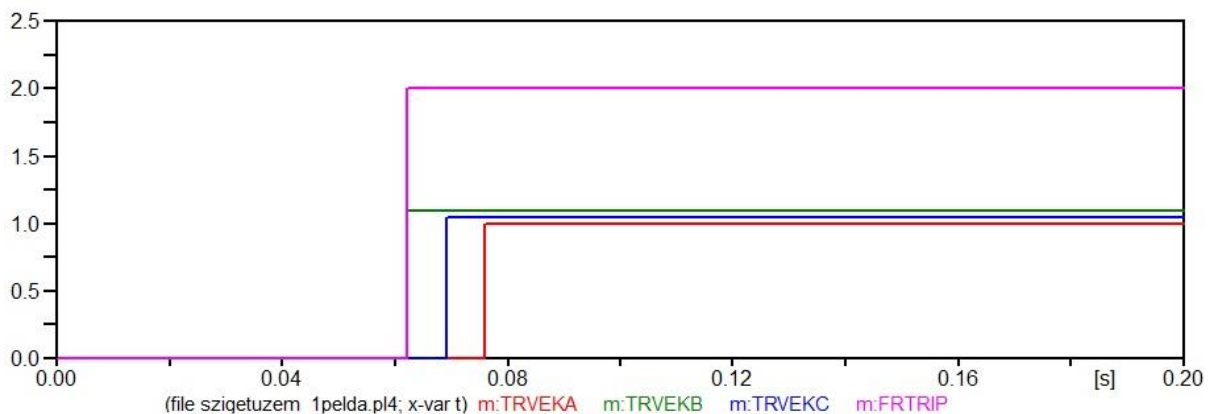
5-8. ábra: 1.példa: Gradiens védelem működése (ébredés és kioldás)

A vektorugrást követően a frekvencia csökkenésének sebessége nagyságrendileg 1Hz/s értékhez tart. A védelem a vektorugrásnak köszönhető nagy gradienssel együtt indul. Ez nem probléma, sőt gyorsítja a védelmi működést, hiszen ha ezt követően a frekvencia nem csökkenne tovább, akkor a védelem visszaesne. Az ébredéssel együtt 5 periódust követően helyesen a funkció kioldóparancsot ad.

A vektorugrás megszólalási értékének 5° -ot választottam. A vektorugrás és a védelmi jelek a következő 5-9. ábra 5-10. ábraán láthatóak, amennyiben a többi védelmi funkció tiltva van.



5-9. ábra: 1.példa: Vektougrás

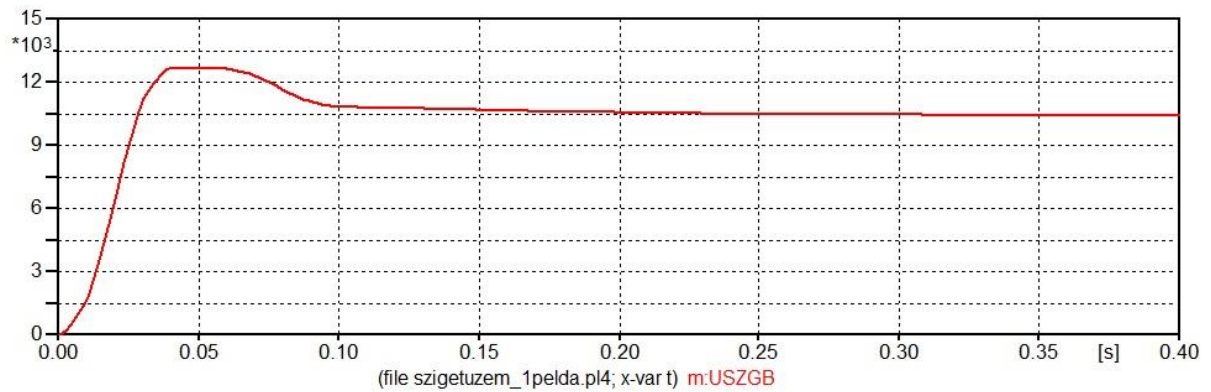


5-10. ábra: Vektorugrás védelem működése (ébredés és kioldás)

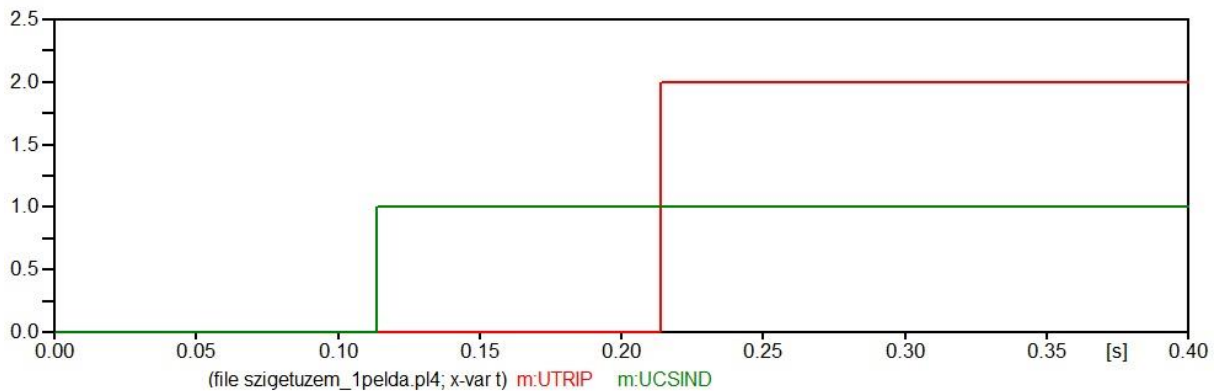
A vektorugrás görbéjének alakjában megfigyelhető, hogy a vektorugrást követő periódusban ellentétes előjellel szinte azonos szögváltozás jelenik meg. Ez csupán annak a következménye, hogy a vektorugrást számító algoritmus az aktuális és az előző periódusidő különbségéből számolja a szöget, így egy kiugró periódusidő érték két perióduson keresztül fog változást okozni, ellentétes előjellel.

A vektorugrás legkorábban B fázisban, 10ms-mal a mögöttes hálózat leválását követően kerül érzékelésre. Ennek oka, hogy a három fázis közül a szigetüzem kialakulása után B fázisban van először pozitív nullátmenet (10ms-mal később), így csak akkor történik meg az új mérési eredmény kiértékelése. A védelem helyesen ébred a vektorugrás megjelenését követően, és késleltetés nélkül kioldási parancsot ad.

A mögöttes hálózat leválásának következtében a hálózatrész meddő teljesítmény egyensúlya megbomlik, a meddő teljesítmény hiány miatt a feszültség hirtelen lecsökken. A feszültségcsökkenési védelem megszólalási értékének a 22kV-os (vonali) feszültségszintnek a 85%-os határa számítható 10.8kV-os fázisfeszültség értéket állítottam be. A kiserőmű 22kV-os oldalán a védelmi eszköz által mért feszültség alapharmonikus pozitív sorrendű összetevője és a védelmi jelek a következő 5-11. ábra 5-12. ábraákon láthatóak (ha a feszültségcsökkenési védelmen kívül a többi funkció tiltva van):



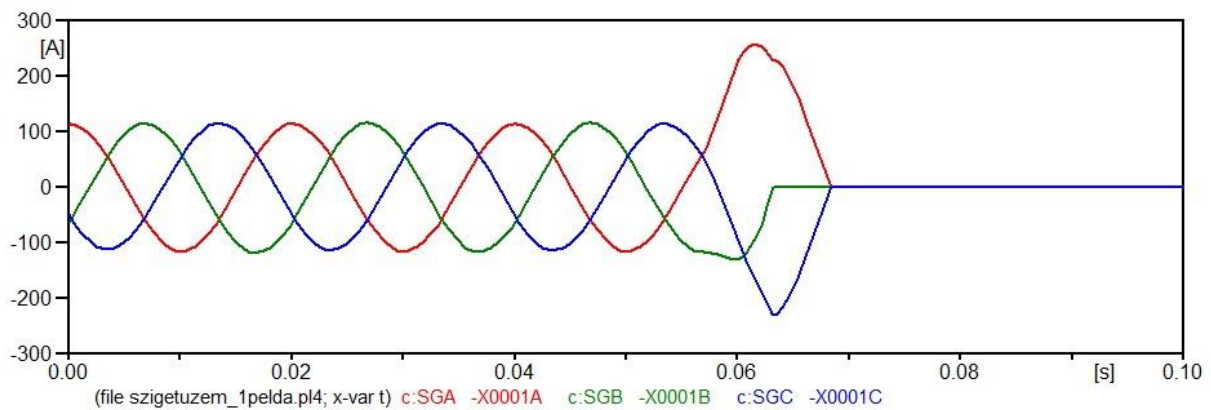
5-11. ábra: 1.példa: Csatlakozási pont pozitív sorrendű feszültsége



5-12. ábra: Feszültségcsökkenési védelem működése (ébredés és kioldás)

A mögöttes hálózat 0.055ms-ban történő leválása után a feszültség kicsivel több, mint 50ms idő alatt csökken a beállított megszólalási érték alá, aminek következtében ébred a védelem, és a 100ms-os késleltetésének megfelelően helyesen kioldási parancsot ad.

Amennyiben minden védelmi funkció engedélyezve van, leggyorsabban a vektorugrás védelem ad kioldási parancsot. A megszakító kikapcsolását engedélyezve a kiserőmű felől a hálózatrész felé folyó áramokat a következő 5-13. ábra illusztrálja:



5-13. ábra: 1.példa: Kiserőmű által hálózatba injektált áram 0.055s-ban történő 3F zárlatkor

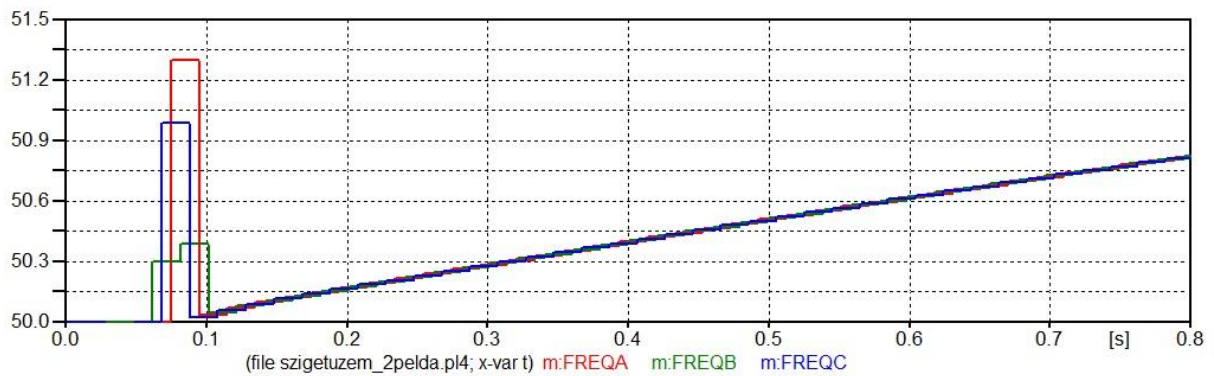
A mögöttes hálózat 0.055s-ban lekapcsolódik, a vektorugrás védelem a fentebb bemutatott módon 10ms-mal később ébred, és egyből kioldási parancsot ad. A megszakító ennek következtében B fázisban azonnal (hiszen épp áram nullátmenet van), míg A és C fázisban 5ms-mal később megszakítja a fázisok áramát. A valóságban természetesen lassabb a megszakítók működése (40ms nagyságrendű).

2. Példa: 13MW hatásos és 6Mvar meddő teljesítményt szolgáltató kiserőmű csatlakozik a közepesfeszültségű gyűjtősínre (GYSIN), és a mögöttes hálózat leválásával 0.55s-ban szigetüzembe kerül.

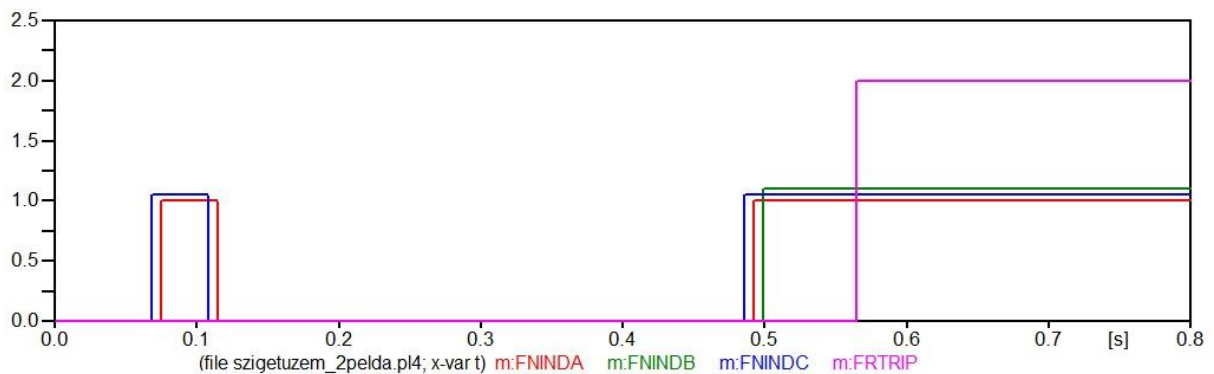
Az előző példában bemutatásra került a frekvenciacsökkenési, gradiens, vektorugrás és feszültségcsökkenési védelmi funkció helyes működése, így ebben a pontban elsősorban a frekvenciaemelkedési és feszültségemelkedési védelmek ismertetése az elsődleges cél.

A hálózatrész szigetüzembe kerülésekor a termelt és fogyasztott hatásos és meddő teljesítmény egyensúly megbomlik, a teljesítmény többletnek köszönhetően a frekvencia és a feszültség szint is növekedésnek indul. A generátorokat nem szokás ilyen mértékben túlterjeszteni, a nagy meddő teljesítmény betáplálás csupán a feszültségnövekedés jelenségének bemutatását szolgálja (hiszen több meddő teljesítményt táplál a hálózatba, mint amekkora fogyasztói igény lenne rá).

A hálózati frekvencia alakulása és a védelmi jelek az alábbi 5-14. ábra 5-15. ábraákon követhetők nyomon (a többi védelmi funkció tiltása mellett). A frekvenciaemelkedési védelem beállított megszólalási értéke 50.5Hz.



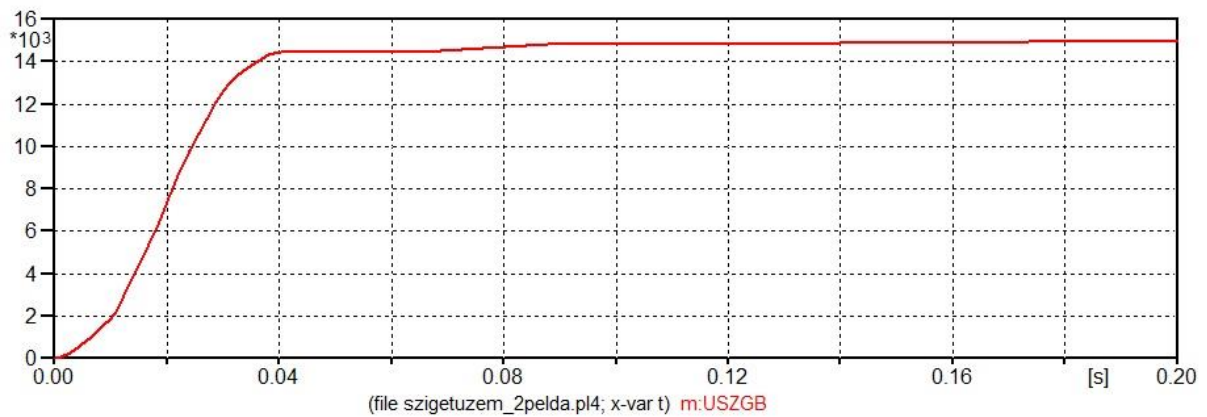
5-14. ábra: 2.példa: Hálózati frekvencia alakulása



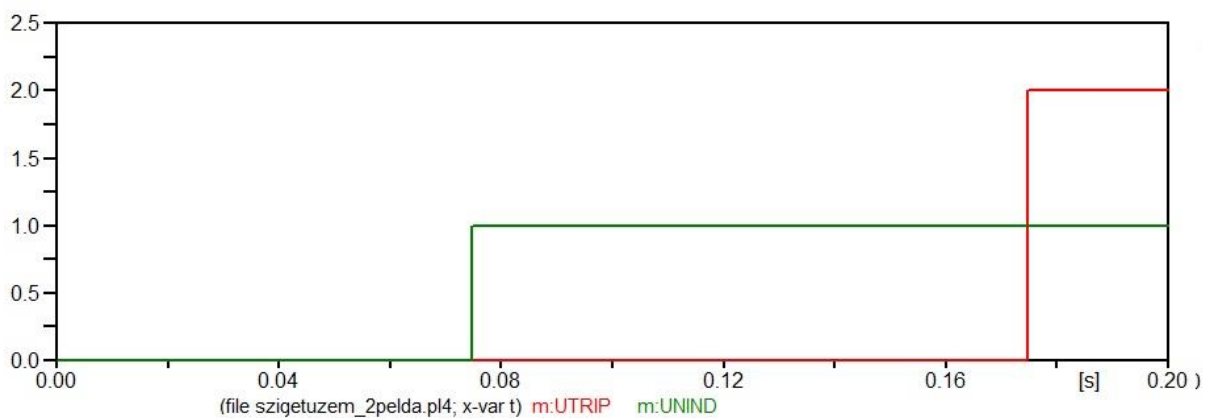
5-15. ábra: 2.példa: Frekvencianövekedési védelem működése (ébredés és kioldás)

A hálózati frekvencia értéke a mögöttes hálózat leválását követően a vektorugrásnak köszönhetően egy, illetve két periódus idejéig jelentősen megnő, majd ez után közel 50Hz-ről fokozatosan emelkedik. Az előző példának frekvenciacsökkenési védelméhez hasonlóan a védelem ébred a vektorugrásra, azonban utána egyből helyesen visszaesik. A mögöttes hálózat leválását követően nagyságrendileg 0.4s-mal a frekvencia eléri a beállított 50.5Hz-es határértéket, és a védelem ébred. Az ötödik határértéket túllépő periódus után a védelem helyesen kioldóparancsot ad.

A csatlakozási pont feszültsége és a feszültségemelkedési funkció védelmi jelei a következő 5-16. ábra 5-17. ábraákon láthatóak. Megjegyzendő, hogy mivel a feszültségemelkedést előidéző meddő energiát a vizsgált kiserőmű szolgáltatja, ezért a mögöttes hálózat leválását megelőzően is magasabb feszültség szint mérhető (összehasonlítva az előző példa feszültségével) a védelmi készülék helyén. A feszültségemelkedés természetesen így is tetten érhető, a valóságban amennyiben más forrás biztosítja a meddő energia táplálását, úgy a feszültség növekedése jelentősebb. A feszültségemelkedési funkció megszólalási értékének a 22kV-os (vonali) feszültség szintnek a 115%-os határára számítható 14.6kV-os fázisfeszültség értéket választottam.



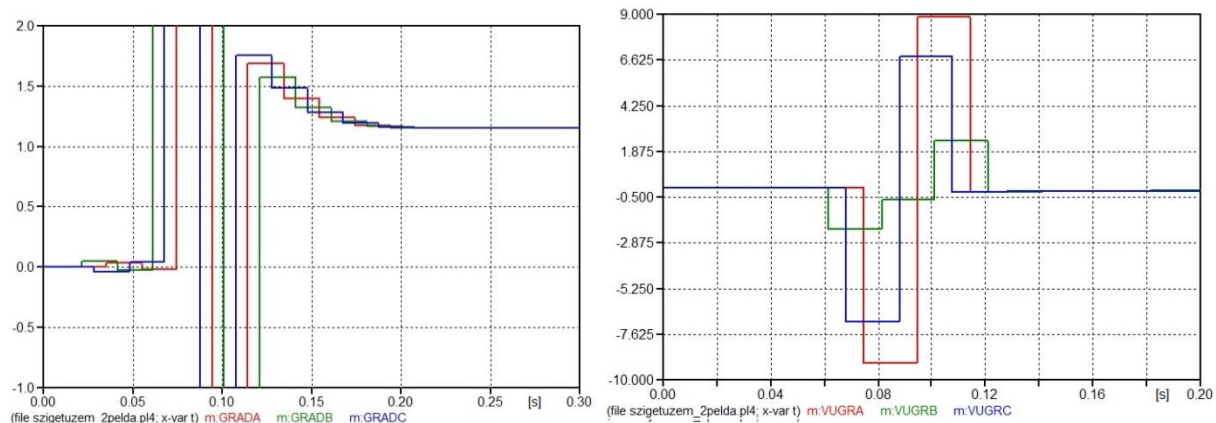
5-16. ábra: 2.példa: Csatlakozási pont pozitív sorrendű feszültségének alakulása



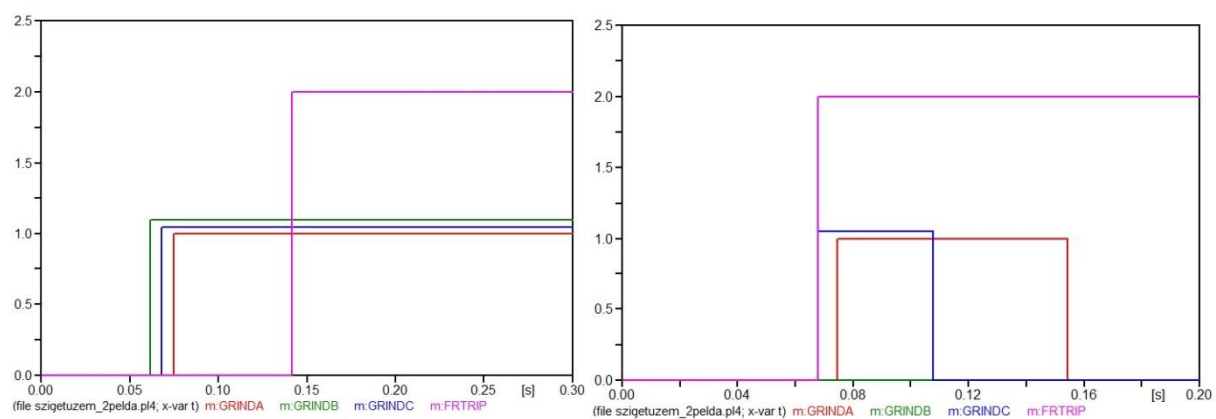
5-17. ábra: 2.példa: Feszültségnövekedési védelem működése (ébredés és kioldás)

A mögöttes hálózat leválását megelőzően az állandósult feszültség szint igen magas (14.4kV fázisfeszültség), de még a megszólalási érték alatti. A szigetüzem kialakulását követően a feszültség szint emelkedésnek indul, és 20ms-mal a leválás után ébred a védelem, majd 100ms-mal később helyesen kioldási parancsot ad.

A gradiens és vektorugrás funkciók ebben a példában is megfelelően működtek, amelyet a következő 5-18. ábra 5-19. ábraákon szemléltetnek. Az ábrák részletes ismertetését elhagyom, mivel az előző példában bemutatott eset védelmi működéseikhez képest nincs jelentős változás.



5-18. ábra: 2.példa: Frekvencia gradiens és vektougrás alakúak



5-19. ábra: 2.példa: Gradiens és vektougrás védelmek működései (ébredés és kioldás)

6 Kiserőművek szigetüzemének felismerésére alkalmas hardver környezet létrehozása

A dolgozatomban előző fejezeteiben az EMTP-ATP szoftverkörnyezetben vizsgáltam az elosztott energiatermelők hálózatra, illetve védelmi berendezésekre gyakorolt lehetséges hatásait, majd a programban általam megvalósított szigetüzem érzékelési funkciók működését mutattam be és ellenőriztem. Ezek segítségével többek között az egyes működési elvek követhetők nyomon, illetve elméleti vizsgálatok folytathatók, hogy adott hálózati eseményekre a védelem miként reagál. Azonban fontos megjegyezni, hogy a valóságban a szoftveres úton kapott eredményeket kellően nagyvonalúan szabad csak kezelni, ahol elsősorban nem a pontos értékek, hanem a jelenség előfordulása hordoz valós információt. A kapott értékek csak iránymutatóak, amelyek pontossága a hálózati és az egyes eszközök modelljének részletességét tükrözik, azonban mint minden szimulációs modell esetén a valóság tökéletesen semmilyen esetben sem képezhető le.

6.1 Védelmi készülékek tesztelése

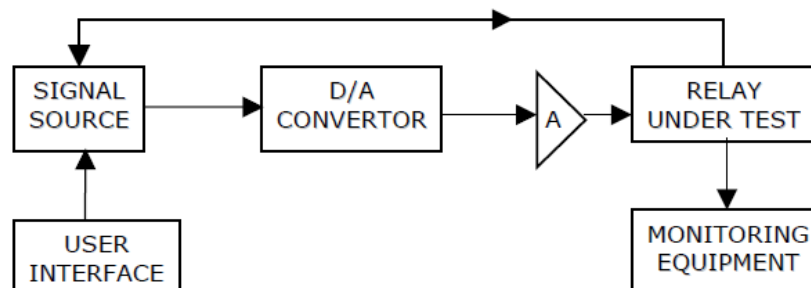
A gyakorlatban a védelmi készülékek helyes működését és működési idejének (és szórásának) meghatározását minden esetben a vizsgálat tárgyát képező berendezés tesztelésével szükséges elvégezni.

A védelmi berendezések helyes működésének biztosítása érdekében kulcsfontosságú azokat telepítés előtt és a telepítés utáni rendszeres karbantartásokkor tesztelni. A tesztelések kulcsfontosságú eleme a helyes vizsgálójel megválasztása, illetve olyan körülmények szimulálása, amely a valóságban bekövetkező és lezajló eseményeket a lehető legjobban leképezi, ehhez pedig elengedhetetlen a villamosenergia-rendszer kellően pontos modellezése.

A vizsgáló készülékek technológiája a védelmi berendezésekkel együtt fejlődött az 50-es évektől kezdve. A kezdeti nagy méreteket (néha szoba méretű) a félvezető technológia elterjedésével felváltották a kisméretű, hordozható teszt berendezések. A digitális technológia térnyerésével megjelentek a digitális védelmek, amelyek vizsgálatához olyan digitális szimulációs programokat fejlesztettek ki, amelyek matematikai egyenletek megoldásával képezik le a rendszer elemeinek viselkedését. Többek között ilyen szimulációs program a már korábban bemutatott és dolgozatomban során használt EMTP-ATP is. [25]

6.2 Modern tesztberendezések felépítése [25]

A védelmi készülékek vizsgálatához az egyik legfontosabb feladat annak a vizsgálójelnek az előállítása, amire a védelem viselkedését tesztelni szeretnénk. Ezek a jelek előállíthatók digitális visszajátszó szimulátorok segítségével, relévizsgáló berendezésekkel vagy valós idejű szimulátorokkal. Az előállított digitális jelek egy digitális-analóg átalakítón és egy jelerősítőn keresztül kerülnek a védelmi berendezésre, amely kimenetén a védelem vizsgálójelre adott válasza megfigyelhető és rögzíthető. A tesztberendezések e tipikus felépítése látható a 6-1. ábraán.



6-1. ábra: Tesztberendezések általános felépítése

Digitális visszajátszó szimulátor esetén a védelem működésének ellenőrzéséhez szükséges vizsgálójelek vagy egy hálózati szimulációs program futtatásából adódó eredményeinek, vagy egy valós védelmi berendezés zavarító funkciójával rögzített korábbi valós esemény jelalakjainak reprodukálásával kerülnek előállításra.

Relévizsgáló berendezések használatakor a vizsgálójel előállításához nem feltétlen szükséges hálózati szimuláció futtatása. A berendezés a jelalakot a felhasználói beállításoknak megfelelően maga állítja elő.

Az előző jelgenerátor típusok csupán a védelmi berendezések válaszát vizsgálják a rájuk adott vizsgálójelek függvényében. Azonban a valós idejű szimulátorok képesek figyelembe venni a valós védelmi működések visszahatását a szimulációs hálózatra, vagyis egy visszacsatolás van a védelmi berendezés és a szimulációs hálózat között. E szimulátorok hátránya, hogy a hálózati állapotok meghatározásához szükséges egyenletek megoldása különösen számításigényes. A tranziens szimulációk megvalósításához nagyon kicsi időlépcső alkalmazása szükséges, és a megnövekedett számításigényt e rövid időn belül kell a berendezésnek elvégeznie, ennek kivitelezése pedig különösen összetett.

Egyes vizsgáló berendezések természetesen több funkcióval is rendelkezhetnek, mint például az *Omicron CMC356* tesztberendezés, amely a fent említett csoportosítás szerint relévizsgáló készülék és visszajátszó szimulátor is egyben.

6.3 Omicron CMC356



6-2. ábra: Omicron CMC356

Az *Omicron CMC356* egy számítógép által vezérelt vizsgáló berendezés, amelynek részét képezik a fizikai készüléken kívül a teszteléshez szükséges szoftverek is. A *CMC356*-os készüléket többek között az alábbi eszközök vizsgálatára tervezték [26]:

- védelmi készülékek
- jelátalakítók
- fogyasztásmérők
- hálózati analizátorok

A vizsgáló készüléknek 3+1 feszültség és 6 áramkimenete van, így alkalmas akár differenciálvédelmek tesztelésére is.

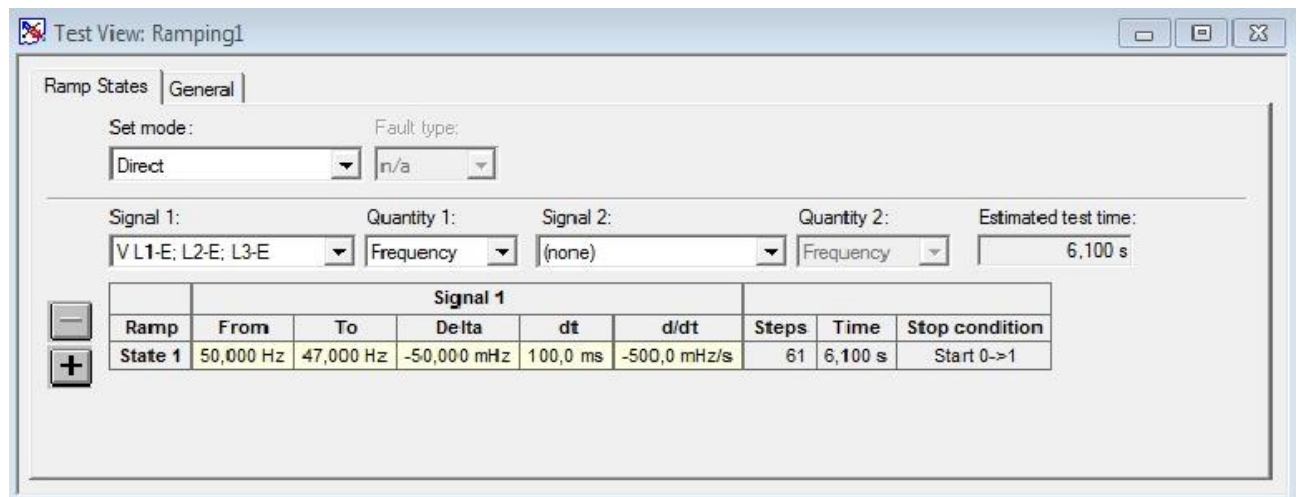
A *BME Villamos Energetika Tanszékének Smart Grid* laboratóriumában az említett készülék a rendelkezésemre állt, ezért lehetőségem volt kipróbálni a berendezést, a hozzá tartozó szoftvereket és néhány mérést végezni a segítségével. A laboratóriumban szintén használhattam a *Protecta Kft.* egy *EuroProt+* védelmi készülékét, amire a *Protecta* jóvoltából a dolgozatom témája szempontjából releváns frekvenciacsökkenési és emelkedési, valamint frekvencia gradiens védelmi funkciók telepítve lettek. A frekvenciacsökkenési védelem megszólalási értékének 49.5Hz-et, növekedésre 50.5Hz-et, míg a gradiens védelmi funkcióra -0.5Hz/s változási sebesség értéket

állítottam be. Késleltetési időnek mindhárom esetében a beállítható minimális 140ms-ot választottam.

Amennyiben a vizsgáló berendezés a jelalakot a felhasználó beállítása szerint maga állítja elő (tehát nem visszajátszás történik), akkor vizsgálathoz a felhasználónak a *Test Universe* programcsomag teszt moduljai közül van lehetősége választani. Itt olyan programok találhatók meg, mint a *QuickCMC* vagy a *Ramping*, de külön tesztprogramok vannak túláramvédelem, távolsági védelem és differenciálvédelmek vizsgálatához is. Én az első kettővel teszteltem a védelem helyes beállításait.

A *QuickCMC* az egyik legegyszerűbb tesztmodul, amely gyors védelmi ellenőrzések elvégzésére alkalmas. A berendezés képességeinek megismerését az új felhasználónak érdemes ezzel kezdenie. A feszültség és áram kimenetek amplitúdójának, fázisának és frekvenciájának manuális változtatására van a programban lehetőség. Segítségével ellenőriztem, hogy a frekvenciacsökkenési védelem 49Hz-es feszültséggel esetén a beállításának megfelelően kiold-e. A védelmi berendezés helyesen kioldási parancsot adott.

A *Ramping* elnevezésű program egy fokkal összetettebb. A szoftver a feszültség, a frekvencia vagy a fázis lépcsőzetes változtatásával módosítja a választott kimeneti jeleket. Segítségével már nem csupán a védelem helyes működését lehet egyszerűen tesztelni, hanem megszólalási értékeinek pontosságát is lehet ellenőrizni, azonban segítségével én csak a frekvencia gradiens védelmi funkció helyes működését teszteltem, amelyhez az alábbi 6-3. ábraán látható beállításokat használtam. A fázisfeszültségek frekvenciáját 50Hz-ről fokozatosan 500mHz/s sebességgel csökkentve 47Hz-ig vártam a védelem indulását a frekvenciacsökkenési védelmi funkció kikapcsolása mellett, amely helyesen ébredt és kioldási parancsot adott.



6-3. ábra: Ramping program

6.4 CM Engine [27]

A vizsgáló berendezés rugalmas kezelhetősége érdekében a *CM Engine Test Console*-on keresztül a készülék működésének programozására is mód van. Az *Omicron* programozási lehetőségei csupán magas szinten kerülnek bemutatásra, amelyet egy egyszerű példával illusztrálok.

A *CM Engine* segítségével egy vagy akár több *Omicron CMC* készülék tetszőleges funkciója vezérelhető. Használhatóak előre definiált hullámalakok (pl. szinusz, exponenciális, négyszögjel, stb.) vagy akár a felhasználó maga is definiálhatja őket, továbbá ezek összeadásával, szorzásával újak is előállíthatók. A készülék bináris és analóg bemenetei jeleinek mintavételezésével a védelmi jelek is felhasználhatóak és kiértékelhetőek.

Az alapvető utasítások a bemenetre („**inp**:...”), a kimenetre („**out**:...”), az erősítésre („**amp**:...”) és a szekvenciára („**seq**:...”)-ra vonatkozóan adhatók. A szekvencia a program kereteit definiálja, amelyben az utasítások a sorrendjüknek megfelelően kerülnek végrehajtásra. A szekvencia kezdetét **seq:begin**, míg végét **seq:end** parancsokkal lehet meghatározni, de a parancsok csak az ezt követően adott **seq:exec** parancs hatására kerülnek elvégzésre.

A *CMC* berendezés effajta programozásakor a készülékbe csak egy darab megírt szekvencia tölthető be, amelyet a saját memóriájában tárol el. Az utasításokat a saját processzora végzi, így a számítógép adott esetben más számolásokat végezhet. A szekvencián belüli programrészeket a **seq:wait()** paranccsal lehet különválasztani, amelyben a továbblépéshez feltételeket is lehet kötni, illetve adott feltételek teljesülése esetén megadható, hogy a szekvencia melyik másik pontjára ugorjon a program végrehajtása.

```

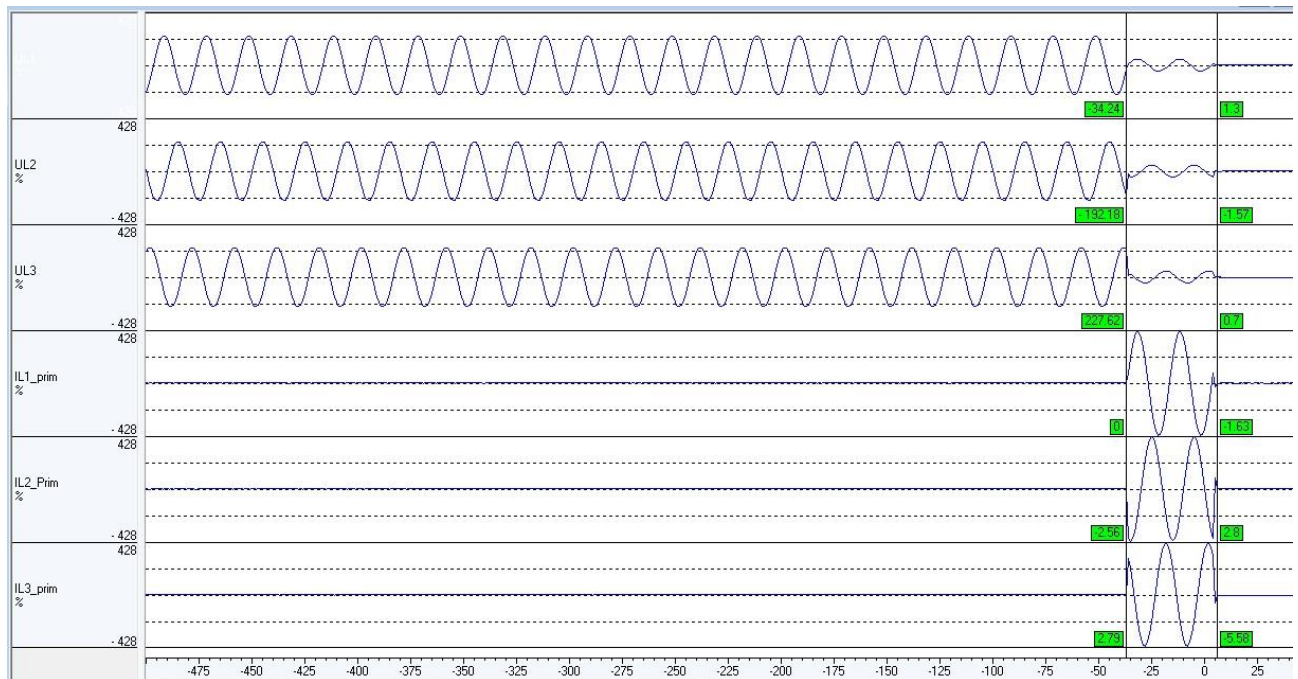
Script:
1 ; Sequence for a shot (prefault, fault, postfault)
2
3 seq:begin
4 ; Start of the prefault (V=100V, I=0)
5 inp:buf:clr
6 out:v(1:1):a(100);f(50);p(0);wav(sin)
7 out:v(1:2):a(100);f(50);p(-120);wav(sin)
8 out:v(1:3):a(100);f(50);p(120);wav(sin)
9 out:i(1:1):a(0);f(50);p(0);wav(sin)
10 out:i(1:2):a(0);f(50);p(-120);wav(sin)
11 out:i(1:3):a(0);f(50);p(120);wav(sin)
12 out:on
13 ; Apply prefault for 0.5 seconds
14 seq:wait(0.5,1)
15 ; Fault: V=20V, I=3A
16 inp:buf:sam(bin,on)
17 out:v(1):a(20)
18 out:i(1):a(3)
19 out:on
20 ; Apply fault until binary input 1 trips with
21 ; a timeout of 3 seconds
22 seq:wait(bin(1),1,3,1)
23 ; Postfault: switch all outputs off
24 inp:buf:sam(bin,off)
25 out:off
26 seq:end
27
28 ; Start the sequence
29 seq:exec
30
31 ; Wait until it is over
32 #wait 4
33
34 ; Read the entries in the measurement buffer
35 #loop 5 inp:buf:get?
36

```

6-4. ábra: CM Engine példaprogram

A 6-4. ábraán a korábbiakban leírtakat bemutató példaprogram látható. A 3. és 26. sor között találhatóak a szekvencia egyes utasításai. A program az ezt követően (29. sorban) érkező **seq:exec** parancs hatására fog lefutni, és fogja az *Omicron* az egyes parancsokat végrehajtani. A program először a 6-8. sor szerint a feszültség három kimenetére 100V effektív értékű pozitív sorrendű fázisfeszültségeket állít be, illetve a három áram kimenetére 0A effektív értékű szintén pozitív sorrendű szinuszos áramot. A végrehajtás során az **out:on** paranccsal kerülnek ki a kimenetre a fizikai jelek. A következő esemény a **seq:wait(0.5,1)** paranccsal kerül elválasztásra az előzőtől, melynek következtében 0.5s várakozás után a végrehajtás a következő parancsra ugrik. A 16. sorban a vizsgáló berendezés bináris bemenetére érkező jelek mintavételezése aktiválásra kerül, majd az összes feszültség kimenet effektív értéke 20V-ra, míg az áram kimeneteinek effektív értékei 3A-ra lesznek megváltoztatva. Az előzőhöz hasonlóan az **out:on** paranccsal kerülnek ki az új jelek a kimenetre. A **seq:wait(bin(1),1,3,1)** parancs feltételt szab a következő utasításra való ugráshoz: akkor lép tovább a program, ha az 1-es bináris bemenetre jelzés érkezik (pl. védelmi készülék kioldójele), vagy ha 3s eltelik jelzés érkezése nélkül. Ezt követően a bemenetek mintavételezése kikapcsolásra kerül, illetve a kimenetről is visszavételre kerülnek a fizikai jeleket.

A programot egy egyszerű impedanciavédelmen próbáltam ki, a védelem zavarírója által rögzített jeleken követhetőek a kimenetek utasításoknak megfelelő megváltozása (6-5. ábra). Az áram megnövelését követően az impedanciavédelem kioldási parancsot adott, így a programkód 22. sora miatt a kimeneti jelek kikapcsolásra kerültek.



6-5. ábra: Példaprogram futtatásának eredménye egy egyszerű impedanciavédelmen

A *CM Engine* kezelőfelületén azonban csak egyszerűbb programok megírására van mód, ugyanis nincs lehetőség ciklusszervezésre, így komplexebb vizsgálati programok nem kivitelezhetők. Ugyanakkor objektum orientált programozási nyelveket (pl. C++, C#, stb.) alkalmazva lehetőség van összetettebb tesztprogramok megírására is: az egyes utasításokat sztring formátumban elküldve a *CM Engine* programnak a parancsok végrehajtásra kerülnek.

6.5 TransPlay

Az *Omicron* berendezés vizsgálójeleinek előállítása történhet az *EMTP-ATP* szimulációs program futtatásából adódó kimeneti eredményeinek visszajátszásából is. Ebben az esetben két lehetőség van a védelmi készülék tesztelésére [28] [29]:

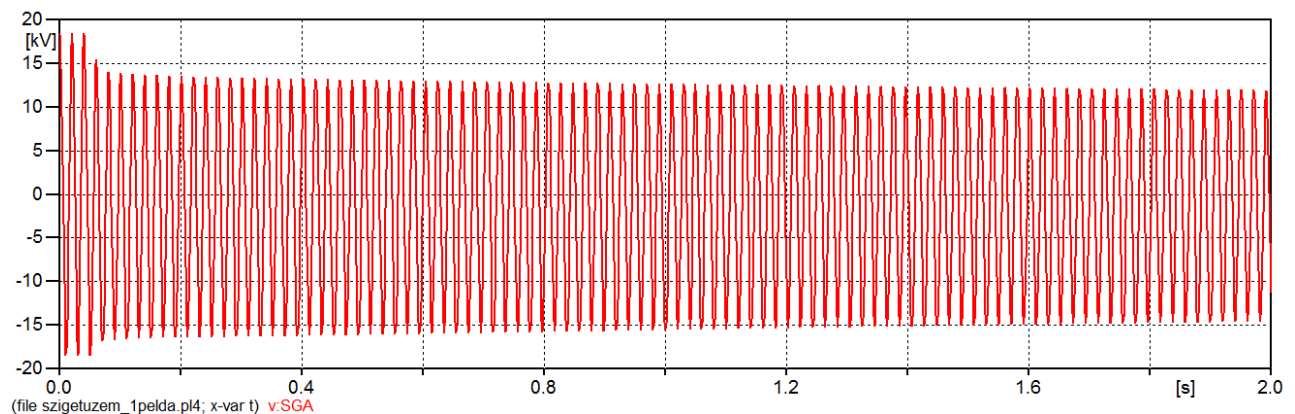
- az *ATP* szimuláció eredményeit tartalmazó *.pl4* fájl *COMTRADE* formátumba konvertálását követően az *Omicron* vizsgálóberendezés *TransPlay* nevű programjának segítségével a hálózati szimuláció során előálló jeleket a védelem számára visszajátszani,

- b) az *ATPDesigner* programban az *ATP* szimuláció eredményeként előálló *.pl4* fájlt futtatva a *CM Engine DLL*-en keresztül közvetetten működtetni a védelmi berendezést tesztelő *Omicron* készüléket.

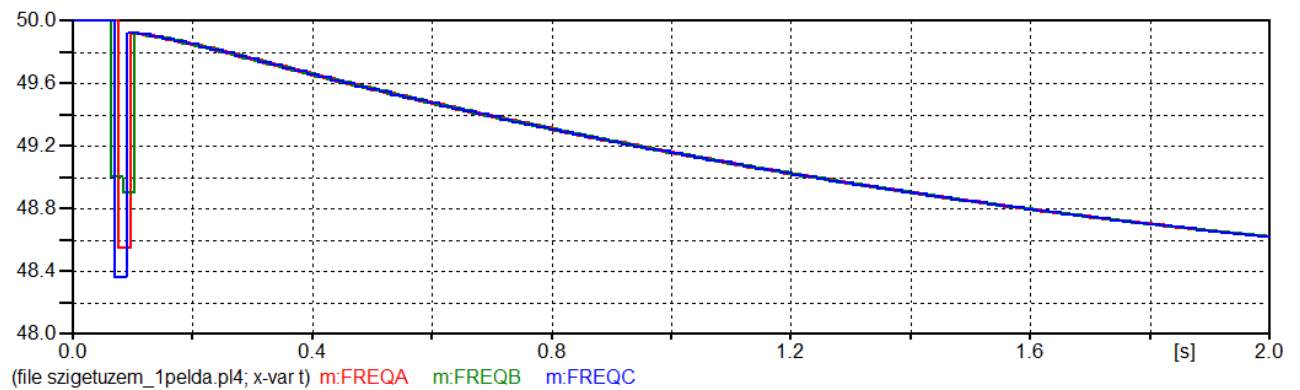
Az *ATPDesigner* program nem állt rendelkezésemre, így az előbbi lehetőséget próbáltam ki a valóságban is.

A frekvenciacsökkenési és gradiens védelmet tesztelve a célom az 5.3 fejezet 1. példájában futtatott *ATP* fájl visszajátszása volt. A példában a középfeszültségű gyűjtősínre csatlakozó 3MW hatásos teljesítményt szolgáltató ($\cos\varphi=1$) kiserőmű 0.055s-ban a mögöttes hálózat leválásával szigetüzembe kerül a hálózatrész fogyasztóival, így a frekvencia csökkenésnek indul. Mivel a védelmi berendezés a frekvenciát a mintavételezett feszültségértékekből határozza meg, így az *Omicron* berendezésnek csak a feszültség kimeneteit használtam, amelyet az *EuroProt+* készülék feszültségkártyájának megfelelő bemeneteire csatlakoztattam.

Az *ATPDraw*-ban a szimulációt futtatva a kiserőmű csatlakozás pontján a feszültség az *A* fázisban az alábbi 6-6. ábra szerint alakul, a többi fázist nem ábrázoltam, azonban a továbbiakban felhasználtam őket. A három fázis frekvenciájának változása a 6-7. ábraán látható. Ez teljes mértékben megegyezik az 5-14. ábrával, csupán 2s ideig futtattam a szimulációt.

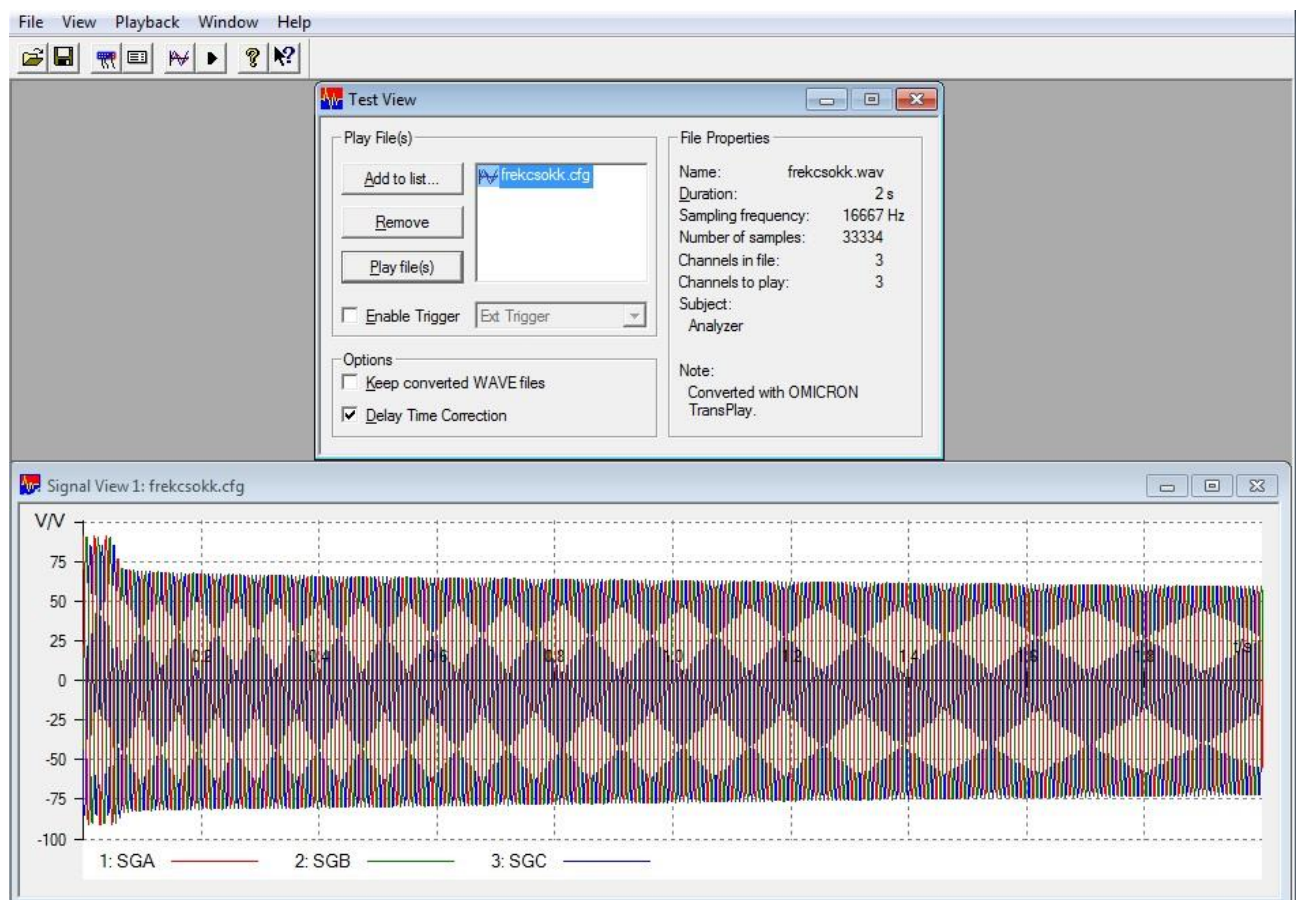


6-6. ábra: Kiserőmű csatlakozási pontjának feszültsége 0.055s-ban történő szigetüzem létrejötte esetén



6-7. ábra: Kiserőmű csatlakozási pontján a frekvencia 0.055s-ban történő szigetüzem létrejötte esetén

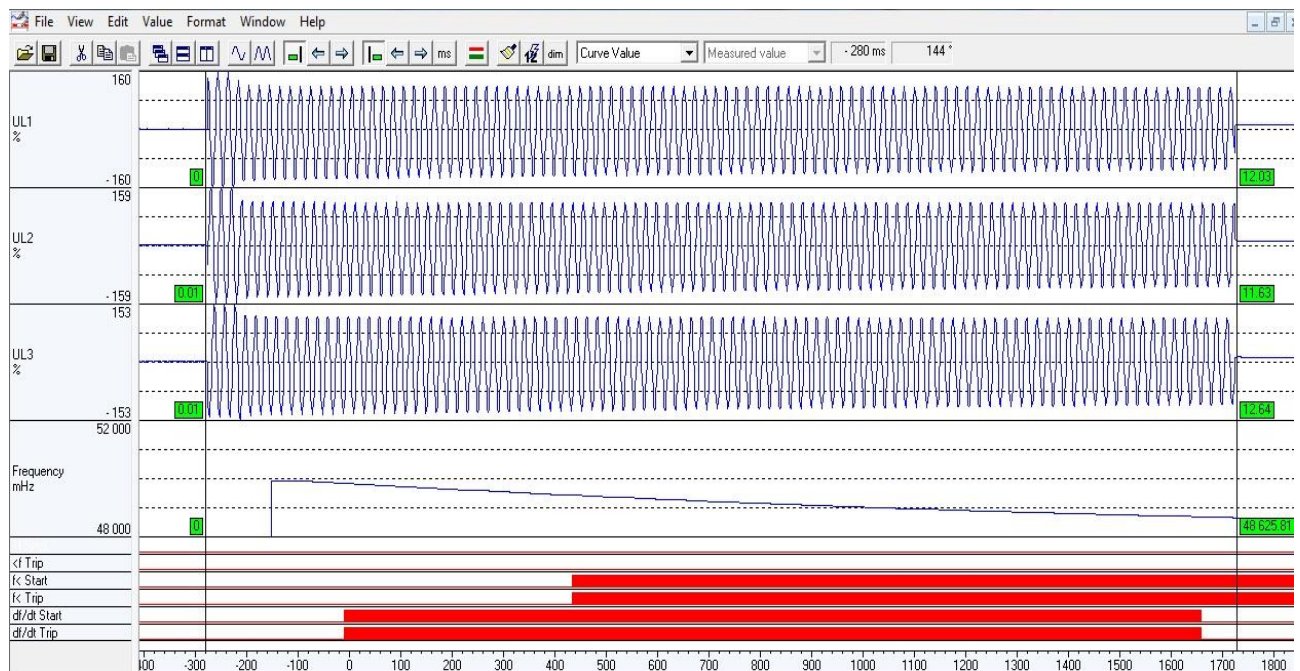
A szimuláció eredményeként előálló .pl4 fájl COMTRADE formátumba való konvertálását az ATP Analyzer program segítségével valósítottam meg. Előtte azonban a visszajátszáshoz szükséges mintavételezést 16667Hz frekvenciával elvégeztem, amely által a 2s-os szimulációs idő miatt 33334 darab minta keletkezett fázisonként. Az így létrehozott COMTRADE fájlt az Omicron berendezés TransPlay nevű visszajátszó programjával nyitottam meg, és a védelmi készülék feszültségkártyájának 100V-os bemenete miatt a szükséges áttételeket beállítottam.



6-8. ábra: TransPlay kezelőfelület

A 6-8. ábraán látható a *TransPlay* program kezelőfelülete, ahol a *COMTRADE* fájl betöltését követően megtekinthetők a lejátszani kívánt jelek, illetve azok alapjellemzői (lejátszás időtartama, mintavételezési frekvencia, minták száma, stb.).

A fájl futtatását követően a védelmi berendezés zavarírója által rögzített jeleket a *Disturbance Record Evaluator* nevű programmal ábrázoltam, amelyet a következő 6-9. ábra mutat be.



6-9. ábra: Védelem zavarírója által rögzített feszültségjelek és a védelem működése

Az egyes kurzorok segítségével leolvashatóak a védelmi funkciók működési ideje. A védelmi berendezésre a feszültségjelek ráadását követően 124ms-mal érkezett az első érvényes frekvenciaérték. Nincs minden fázisra külön frekvenciaérték, hiszen a *Protecta* készülékei a három fázis kevert feszültségéből állítanak elő egy négyszögjelet, aminek a frekvenciáját aztán mérik. A 124ms egyrészt tartalmazza az első periódus előállításához szükséges időt, másrészt a mért frekvencia elfogadásához szükséges 4 darab egymást követő azonos mérési eredményt [8]. Az első érvényes frekvenciaérték után 144ms-mal szólalt meg a gradiens védelem és azonnal kioldási parancsot is adott. Ez nagyjából megegyezik a beállított minimális késleltetésnek, amely 140ms. A frekvenciacsökkenési védelem 49.5Hz-es megszólalási értéke alá a frekvencia a jeladást követő 608. ms-ban csökkent, amely után 104ms-mal a funkció ébredt és kioldási parancsot adott. A funkció akkor szólal meg, ha legalább öt mért frekvenciaérték a beállított frekvencia alatt van [8]. Az első határértéken kívüli frekvenciát követően még 4 periódus szükséges az ébredéshez, ami nagyságrendileg 80ms lenne, a maradék 24ms a védelem nem késleltetésből származó működési

ideje. A funkció minimálisra beállított (140ms) késleltetésénél jóval korábban adott kioldási parancsot a védelmi berendezés. A gradiens védelmi funkció gyakorlatban történő alkalmazásának oka is jól megfigyelhető: 424ms-mal korábban szólalt meg, tehát majdnem fél másodperccel korábban, mint a frekvenciacsökkenési védelmi funkció.

A kapott eredményeket összehasonlítva az 5.3 fejezetben általam modellezettektől szembetűnő, hogy míg a modellben a késleltetést a védelem ébredésétől számoltam, addig a valós védelmi készülékben az ébredés és a kioldás egyszerre történik meg, a védelem ébredése nincs az első határértéken túli jelhez kötve. Ezen kívül a valóságban a minimális késleltetési értékeknek megfelelően később szólalt meg a védelem, mint a modellezésem során. Azonban ez nem meglepő, hiszen a modell csak a késleltetést képezte le, a védelem működési idejét nem. A frekvencia gradiens és csökkenési védelem megszólalása ideje közötti nagyságrendileg fél másodperces differencia a modellemben is megfigyelhető.

Továbbá megjegyzendő, hogy az *ATPDraw*-ban általam készített frekvenciamérésen alapuló védelmek (a vektorugrás kivételével) modelljeiben a késleltetést a periódusok számával lehet definiálni, míg a *Protecta* védelmi berendezéseiben a késleltetési időt szükséges megadni.

Az *ATPDraw*-ban általam készített frekvenciamérő megfelelő működése ellenőrizhető a védelmi készülék által mért frekvencia összehasonlításával: a 2s végén a modellem által mért utolsó frekvencia a három fázisra rendre 48.616Hz, 48.618Hz és 48.621Hz, míg a védelmi berendezés által azonos pontban mért frekvencia 48.625Hz. Az eltérés minimális, így a frekvenciamérő modellem működése helyesnek tekinthető.

7 Összegzés

Diplomatervemben a szabadvezetékes, kompenzált, középfeszültségű hálózat és az elosztott energiatermelők egymásra gyakorolt hatásait elemeztem az *EMTP-ATP* szimulációs környezetben.

Dolgozatomban létrehoztam egy középfeszültségű hálózati modellt, amely alkalmas a hálózatra csatlakozó kiserőművek védelmi rendszerekre gyakorolt hatásainak bemutatására. A megfelelő vizsgálatok elvégzéséhez szükség volt a középfeszültségen elterjedten alkalmazott túláramvédelmi berendezések leképezésére, és azok beállításszámításainak elvégzésére. A védelmekkel kiegészített hálózatrész elkészítését követően néhány scenárió segítségével bemutattam egyrészt a modell alkalmazhatóságát, másrészt azt, hogy milyen körülmények idézhetik elő a védelmi készülékek működésének zárlat esetén történő hibás elmaradását. A szimulációk eredménye alátámasztotta, hogy a működések hibás elmaradásának lehetősége nagyban függ a csatlakozó kiserőmű, a mögöttes hálózat és a zárlati hely egymáshoz képesti relatív elhelyezkedésétől, illetve az energiatermelő betáplálásának nagyságától. Hibás védelmi működést minden esetben csak a hálózatrész fogyasztásával összemérhető nagyságú kiserőművi betáplálás esetén sikerült előidézni.

A kiserőművek szigetüzem érzékelésének vizsgálatához a gyártók által leggyakrabban alkalmazott szigetüzem elleni védelmek modelljeit is elkészítettem, és a középfeszültségű hálózati modell segítségével ellenőriztem működésüket. Az elkészített modellekkel az egyes funkciók működési elvei szemléltethetőek, felhasználásukkal szimulációs vizsgálatok folytathatók a hálózaton történő kapcsolási jelenségek kiserőmű védelmi berendezésére gyakorolt hatásainak elemzésére.

Ezt követően bemutattam, hogy miként lehet az *Omicron CMC356* vizsgálóberendezéssel valós védelmi készülékek helyes működését tesztelni, aminek keretében a *Protecta EuroProt+* készülékére telepített frekvenciacsökkenési és gradiens védelmi funkciók működését vizsgáltam a középfeszültségű hálózati modellen kialakuló sziget szimulálásából adódó villamos jelekkel. A valós védelmi készülék működését az általam szimulált eredményekkel összehasonlítva értékeltem a modelletem, amely gyorsabban működött, mint a valós berendezés, de az egyes védelmi funkciók működése az elvártaknak megfelelt, lényegi eltérés a késleltetés értékén túl nem volt.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani konzulensemnek, *Prikler Lászlónak* a dolgozat írása során adott hasznos tanácsaiért.

Köszönöm a *Protecta Elektronikai Kft.*-nek, különösen *Tóth József Krisztiánnak*, hogy a szigetüzem elleni védelmi funkciók kipróbálását lehetővé tették.

Köszönöm *Kiss Józsefnek* a szakmai tanácsait, az elmúlt fél évben sokat tanultam tőle.

Mindenekfelett köszönöm a családomnak a mindenkori támogatásukat.

Irodalomjegyzék

- [1] Nick Hodge: The Truth About Energy- Taking Sides Is Costing You Money, Energy&Capital, September 5th, 2012. (<http://www.energyandcapital.com/articles/the-truth-about-energy/2535>, letöltés ideje: 2014.05.15.)
- [2] Pepermans G., Driesen J., Haeseldonckx D., D'haeseleer W., Belmans R.: Distributed Generation: Definition, benefits and issues, K.U.Leuven- Energy Institute, 2003
- [3] Hunyár M., Schmidt I., Veszprémi K., Vincze Gy.: A megújuló és környezetbarát energetika villamos gépei és szabályozásai, szerk.:Dr. Hunyár Mátyás, Műegyetem Kiadó, Budapest, 2008.
- [4] D. Menniti, A. Pinnarelli, N. Sorrentino, Giovanni Brusco: Islanding detection active methods: Implementation of simulation models using ATP-EMTP, 14th ICHQP, Bergamo, 2010.
- [5] Protecta Elektronikai Kft: EuroProt komplex védelem DSzIV-EP gyári konfigurációval: Szigetüzem elleni védelem (<http://www.protecta.hu/uploads/File/magyar/europrot/Leiras/dsziv.pdf>, letöltés ideje: 2014.05.15.).
- [6] Siemens SIPROTEC: <http://contenido.coes.org.pe/alfrescostruts/download.do?nodeId=81fcb214-05a8-403d-ae14-f6c99bb9ca4d>, letöltés ideje: 2014.05.15.
- [7] Eaton
MRU4: <http://www.eaton.eu/Europe/Electrical/ProductsServices/PowerDistribution/MediumVoltageSwitchgear/ProtectiveRelays/index.htm#tabs-1>, letöltés ideje: 2014.05.15.
- [8] Protecta Elektronikai Kft: EuroProt+ Frekvenciacsökkenési védelmi funkció (http://www.protecta.hu/epp-magyar/Funkciok/30_Frekvenciacsokkenesi_vedelmi_funkcio_V1.1.pdf, letöltés ideje: 2014.05.15.)
- [9] Protecta Elektronikai Kft: EuroProt+ Frekvenciaemelkedési védelmi funkció (http://www.protecta.hu/epp-magyar/Funkciok/23_Frekvenciaemelkedesi_vedelmi_funkcio_V1.1.pdf, letöltés ideje: 2014.05.15.)
- [10] Protecta Elektronikai Kft: EuroProt+ Frekvenciaváltozás sebességét érzékelő védelmi funkció (http://www.protecta.hu/epp-magyar/Funkciok/09_Frekvenciavaltozas_sebesseget_erzekelo_vedelmi_funkcio_V1.1.pdf, letöltés ideje: 2014.05.15.)
- [11] Woodward MRG3-Generator Protection with mains supervision, time overcurrent protection and earth current supervision, Manual MRG3 (Revision C) (www.woodward.com, letöltés ideje: 2014.05.15.)
- [12] Ward Bower, Dr. Michael Ropp: Evaluation of Islanding Detection Methods for Photovoltaic Utility-Interactive Power Systems, Report IEA PVPS T5-09, 2002.
- [13] EMTP: <http://en.wikipedia.org/wiki/Emtp>, letöltés ideje: 2014.05.15.
- [14] EMTP-ATP: <http://www.emtp.org/about.html>, letöltés ideje: 2014.05.15.
- [15] ATPDraw MODELS: http://www.atpdraw.net/help/model_overview.htm, letöltés ideje: 2014.05.15.
- [16] Prikler László, Hans Kristian Høidalen: ATPDRAW Users' Manual version 5.6, Sinef Energy Research, Norvégia.

- [17]Prikler László: Hálózati tranzienseinek számítógépi szimulációja, Villamosenergia-rendszerek laboratórium I. mérési útmutató.
- [18]ABB Numerical three phase overcurrent & earth-fault relay, Type NI 40/41, Brochure, 4. oldal ([http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/7f38f4aef76bf217652572e300288839/\\$file/ni%2040%20relay%20brochure.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot235.nsf/veritydisplay/7f38f4aef76bf217652572e300288839/$file/ni%2040%20relay%20brochure.pdf), letöltés ideje: 2014.05.15.)
- [19]Dr. Raisz Dávid: Csillagpont kezelés kérdései diasor, Villamos energetika tárgy, 2014
- [20]Dr. Geszti P. Ottó: Villamosenergia-rendszerek I., Tankönyvkiadó, 534-535. oldal, Budapest, 1983
- [21]Kiss K., Kovács J., Póka Gy., Radvánszky F., Tábori J., dr. Tombor A., dr. Weingart F.: Védelmek és automatikák villamosenergia-rendszerekben, szerk.: Póka Gyula, MEE Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1988
- [22]Mogyorós Gábor: Túláramvédelem vizsgálata mérési útmutató, BME-VIK, MSc, Villamosenergia-rendszerek laboratórium II.
- [23]Durbák Norbert: Rendellenes állapotok elleni védelmi rendszer modellezése kiserőművek hálózati és szigetüzemi vizsgálatához, Szakdolgozat, Budapest, 2012
- [24]MAVIR: Irányelv 120kV-os vagy nagyobb feszültségű hálózatra csatlakozó erőművek létesítésére és csatlakoztatására (http://www.mavir.hu/documents/10258/111862/Eromuvek-lrelv_20110707.pdf/1b458f25-a72e-4947-a87d-dc664f62225e, letöltés ideje: 2014.05.15.)
- [25]Tamije Selvy Munian: Relay Testing and Software Relay Modeling, Study Report, ES585a, 2003
- [26]Omicron CMC 356 Reference Manual, CMC356.AE.7, 2013
- [27]Omicron CMEngine User Manual, CMEngine.AE.8, 2012
- [28]Dr. Michael Igel: Testing Protection Devices, Alstom Energietechnik GmbH, 2001
- [29]Prof. Dr. Michael Igel: ATPDesigner-Design and Simulation of Power Networks, Saarbrücken, 2005

Digitális mellékletek

A diplomatervem elektronikus mellékletében az alábbi fájlok találhatóak meg:

1. *Kof_halozat_vedelmekkel.acp*: A 4. fejezetben elkészített, 4.2.5 alfejezetben futtatott szimulációs hálózat
2. *szcenario1.acp*: A 4.3.2 alfejezetben futtatott szimulációs hálózat
3. *szcenario2.acp*: A 4.3.3 alfejezetben futtatott szimulációs hálózat
4. *szcenario3.acp*: A 4.3.4 alfejezetben futtatott szimulációs hálózat
5. *szcenario4.acp*: A 4.3.5 alfejezetben futtatott szimulációs hálózat
6. *szcenario5.acp*: A 4.3.6 alfejezetben futtatott szimulációs hálózat
7. *szigetuzem_1pelda.acp*: Az 5.3 alfejezetben futtatott 1. példa szimulációs hálózata
8. *szigetuzem_2pelda.acp*: Az 5.3 alfejezetben futtatott 2. példa szimulációs hálózata