

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Villamosenergetikai Intézet



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

TÚLÁRAM-KORLÁTOZÁSI MÓDSZEREK

Szerzők:

Iványi Bálint

villamosmérnöki szak, III. évfolyam

Nagy Tamás

villamosmérnöki szak, III. évfolyam

Konzulens:

Dr. Morva György

egyetemi docens

Budapest 2012

Bevezető

Az egységteljesítmények egyre jobban terjednek a villamosenergia (VE) elosztásában. Ma már az irodaházak –szállodák ellátása 1-2.5 MVA névleges teljesítményű transzformátorokkal történik. Ezek mögött a 0.4 kV-os oldalon 20-50 MVA-es zárlati teljesítmények léphetnek fel. Ezen szinteken 25- 70 kA-es zárlati áramokkal kell számolni.

Ennek sok negatív következménye van:

- Az épület tűzveszélyessége növekszik;
- A 0.4 kV-os készülékeket extra magas zárlati szintre kell méretezni – ami jelentős többletköltséggel jár;
- Nincs lehetőség a betáplálási transzformátorok párhuzamos üzemére – ami eleve rontja az ellátás biztonságát;
- A hosszabb lekapcsolási idők a költségesebb –nagyobb keresztmetszetű- kábelek igénybevételét jelenti.

Továbbá vannak olyan ipari üzemek, ahol fokozott tűz- és robbanásveszély áll fenn, amelyekben a magas zárlati áramszintek jelentős kockázatot jelentenek. Ilyen helyeken akár 3-4 szeres névleges áramszintre szükséges korlátozni az áramokat (pl. olajfinomítók, vegyi üzemek stb.).

A munkámban olyan megoldásokat kutattam és fejlesztettem, amelyek a feszültség-viszonyok romlása nélkül lehetővé teszik a tetszőleges mértékű zárkorlátozási szintet.

Az **első részben** áttekintettem a különböző szakirodalmi felvetéseket a témában és részlegesen áttekintettem a bejegyzett szabadalmakat.

A **második fejezetben** szimulációkat végeztem néhány megoldással kapcsolatban. Ezek alapján választottam a laborkísérletekre legmegfelelőbb megoldásokat.

A **harmadik fejezet** a konkrét megoldásokkal foglalkozik és bemutatja a labor-kísérletek mérési eredményeit.

A **negyedik fejezet** egy prototípus terveit tartalmazza.

1. Felmérés

- 1.1 Soros L-C rezonáns korlátozó
- 1.2 Gyors olvadóbiztosítós korlátozó
- 1.3 Félvezetős megoldások
- 1.4 Egyéb módok

Részletesen a tirisztoros megoldásokkal foglalkozok, mivel az L_C rezonáns túl nagy méreteket jelentene a C miatt. Az olvadó biztosítós megoldás pedig – a legalacsonyabb költsége mellett működése esetén ellátás kiesést okoz a csere elvégeztéig.

2. Híd típusú túláram-korlátozó

- 2.1 Szimulációk
- 2.2 Megszakítási lehetőség
- 2.3 Egy gyakorlati elrendezés vizsgálata

1.Felmérés, áttekintés

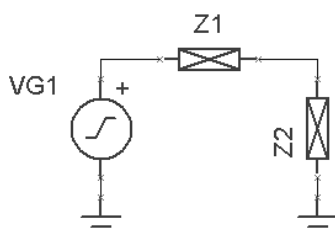
Először is szeretnék egy keveset foglalkozni azzal, mi is a címben szereplő túláram-korlátozó matematikai háttere, illetve mit jelentene az ideális megoldás.

Itt a dolgozatban 3 féle típussal foglalkozunk, az üzemi áram, a túlterhelési áram, és valamilyen fémes zárlat következtében létrejövő zárlati áram. Ezek közül nyilvánvalóan a zárlati szokott lenni a legnagyobb, amit minden esetben el szeretnénk kerülni, ugyanis a legtöbb eszköz tartósan nem bírja el a hatásait, ennek egész egyszerűen főként gazdasági okai vannak. Van persze olyan berendezés is, ami arra lett tervezve, hogy elviselje ezeket az áramokat, ilyenek pl. az áramváltók.

A túlterhelés alatt azonban már nem csak azt kell érteni, hogy egy berendezés valamilyen túlterhelés folytán nagyobb áramfelvétellel kompenzálja a terhelésnövekedést, hanem ide sorolnánk a bekapcsolási (vagy indítási) áramlökéseket is, mivel a hálózat szempontjából nagyjából ugyan az a folyamat játszódik le, azaz a berendezés a névleges áramértéknél nagyobb áramot vesz fel hosszabb-rövidebb ideig.

A dolgozatban ugyanakkor ezen áramfajták közti átmenetet is megpróbáljuk szemléltetni a különböző típusú modelleken, hisz az egyáltalán nem mindegy, hogy miközben a célt szeretnénk megvalósítani, mekkora az az energia mennyiség, ami a hiba (ez esetben nem indulóáram) ideje alatt a hibahelyre / hibás berendezésre jut. Ennek oka, hogy a meghibásodások és anyagi károk nem csak az áram függvényében változnak, hanem az idő függvényében is, így szem előtt kell tartani mind a teljesítmény, mind azt, hogy mennyi ideig állt fenn a hiba.

Tehát nézzük meg egy egyfázisú modellben miről is van szó:



1.ábra

Jelen esetben az egyszerűség kedvéért tekintjük Z_1 -et és Z_2 -t ohmosnak. V_{G1} generátor (vagy mögöttes hálózat) Z_1 a generátor vagy hálózat belső impedanciája, Z_2 a terhelés. Normál esetben:

$$I_{üzemi} = \frac{U_{VG1}}{Z_1 + Z_2}$$

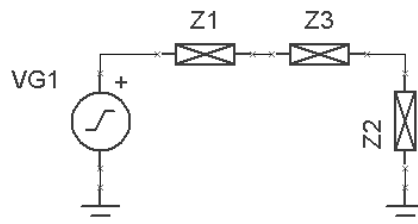
$$Z_2 \gg Z_1$$

a zárlat jelen esetben Z_2 -vel párhuzamos söntág, ekkor:

$$I_{zárlati} = \frac{U_{VG1}}{Z_1}$$

$$I_{zárlati} \gg I_{üzemi}$$

A mi feladatunk, hogy ezt az akár nagyságrenddel nagyobb áramot lecsökkentsük. Létezik párhuzamos megoldás is (igazából csak az ívoltage végett), de alapvetően nekünk egy olyan soros elemre van szükségünk, ami a következő feltételeknek tesz eleget:



2.ábra

az előzőekhez hasonlóan:

$$I_{üzemi}' = \frac{U_{VG1}}{Z_1 + Z_2 + Z_3}$$

$$I_{zárlati}' = \frac{U_{VG1}}{Z_1 + Z_3}$$

1. Z_3 , a soros túláram-korlátozó, amelynek $\cos\varphi$ -je legyen 1, valamint impedanciája üzemi körülmények között legyen 0.
2. Zárlat/túlterhelés esetén Z_3 impedanciája zérusnál nagyobb értéket vegyen fel, annak érdekében, hogy az $I_{zárlati}'$ értéke ne legyen nagyobb $I_{üzemi}'$ -nél, ez tulajdonképpen egy áramgenerátornak a megfogalmazása.
3. Az első pillanatban érzékelje a hiba kialakulását, egy rövid időre se alakulhasson ki a zárlati áram.
4. A zárlat nagyságától függetlenül működőképes legyen (betáp közeli, vagy egy távoli zárlat).
5. Folyamatosan működőképes legyen, ne igényeljen felügyeletet (mondhatni programozni lehet).
6. A működésével ne zavarja a hálózat többi részét, ne okozzon tranzienseket, felharmonikusokat, asszimetriát, feszültségingadozást.
7. A hiba megszűnése után automatikusan vegye fel az üzemi állapotot, és ezt akárhányszor megismételve tartsa üzembiztosságát.
8. Könnyen rendszerbe illeszthető legyen, bárhol üzembe lehessen helyezni.
9. Egyszerű felépítéssel rendelkezzen, és gazdaságilag kifizetődő.
10. Szolgáltasson a hibajellel arányos, vagy a hibát jelző jelet a megszakító/védelem számára.

A 2. pontnál igazából több szempont is elfogadható lenne, hiszen az, hogy milyen környezetben használjuk a korlátozót, alapvetően befolyásolja azt is, hogy milyen hatást várunk el tőle, legtöbb esetben a zárlatos helyet leválasztjuk a hálózatról addig, amíg a hiba ki nincs javítva, de előfordulhat az is, hogy egy minimális szinten tartjuk az áramot, vagy hogy az üzemi értéken. Ennek magyarázata, hogy gyakorlatban valamilyen vezérlés dönti el, hogy milyen értékeket észlelve milyen esemény történjen, ha az áramot az üzemi értéken tudjuk tartani zárlat után is, akkor a vezérlésnek van ideje, hogy eldöntse hogy avatkozzon be, és a hibahely is nagyon könnyen beazonosítható, ugyanakkor a hálózat ebből semmit sem lát.

1.1 Soros (R)LC rezonáns korlátozó

Elméletben ugyan beszélhetünk LC körről, a valóságban azonban RLC körök vannak (egyetlen kivétel a szupravezetős tekercs illetve kondenzátor fegyverzet kialakítás). A tekercs és kondenzátor szinuszos váltóáramú körökben egymás ellen dolgoznak meddő teljesítményt illetően, míg a tekercs fogyasztja a meddőteljesítményt, addig a kapacitás termeli. Alapvetően inkább szűrési feladatra alkalmas, tekintve, hogy a rezonancia frekvencián a soros rezgőkörnek impedancia minimuma van (aminek a nagyságát a jósági tényező határozza meg), ennek ellenére alkalmassá tehető hibaáram korlátozásra is. A működése, mint korlátozó abból áll, hogy a rezgőkörben a két egymásba alakuló energia (a mágneses tér energiája, és a villamos tér energiája) nem tud tetszés szerinti gyorsasággal kialakulni (vagy inkább változni), azaz egy rezgőkört nem vagyunk képesek azonnal teljes amplitúdóval rezgésbe hozni, sem 'rezgésmentesíteni', a rezgőkörnek fel kell gerjednie, amihez idő kell, amit főként a betáplálás teljesítménye határoz meg. Egy ilyen felgerjedési görbe TINA szoftverrel ábrázolva látható a 2. ábrán. Az RLC kör impedanciája felírva:

$$\bar{Z} = R + i(X_L - X_C)$$

rezonancián:

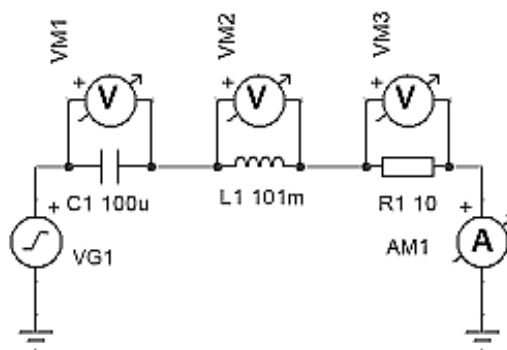
$$F_{rez} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$X_L = X_C$$

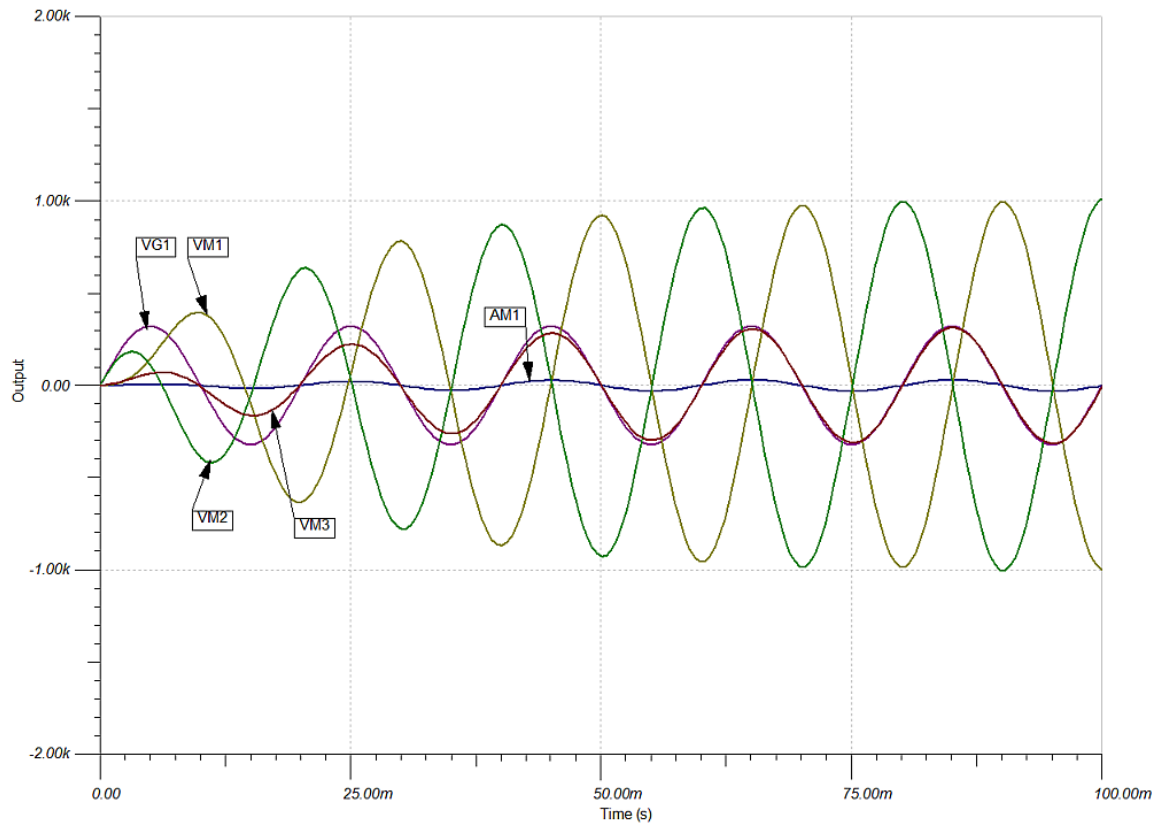
azaz:

$$Z = R$$

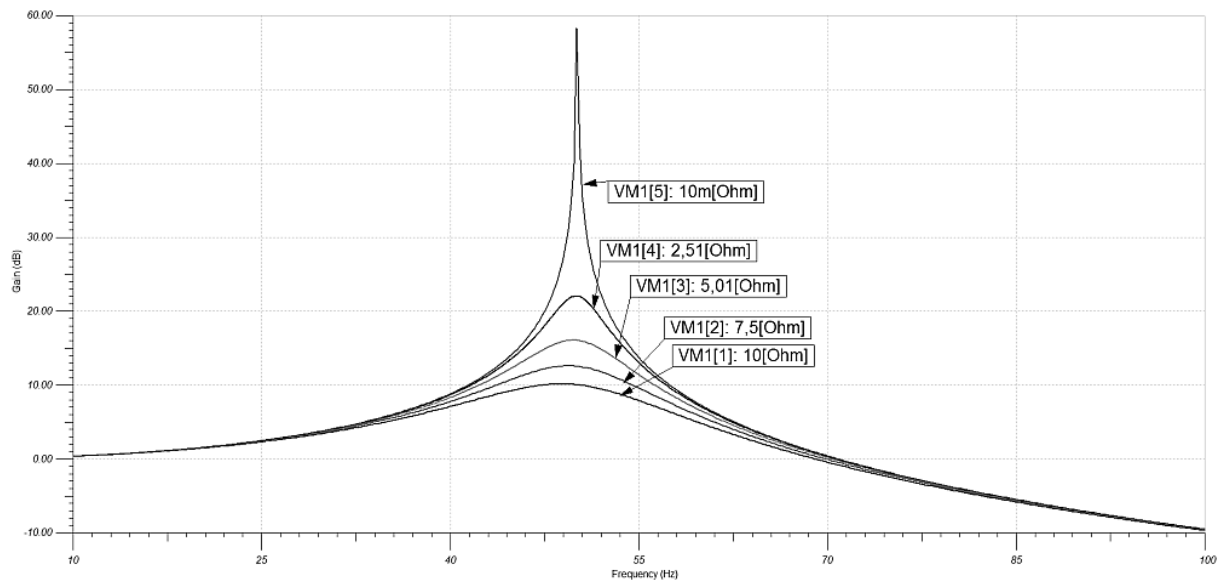
A szimulációhoz tartozó rajz:



3.ábra



4.ábra



5.ábra

A frekvencia 50Hz, a csúcsfeszültség 320V. A rezgőkör felgerjedése nagyjából 100ms-ra tehető, ez 5 periódusnyi időt jelent, azaz ekkor 'tűnik el' a körből az LC tag, és ideális esetben csak az ohmos, rezisztív elem lesz látható a generátor szempontjából, mint terhelés. Tehát amint beáll ez a fix terhelőáram, a rezgőkör tulajdonképpen egy rövidzárként működik. Ha a terhelés megnő, az áram az induláshoz hasonlóan nem tud hirtelen megemelkedni, kell néhány periódusnyi idő (a terhelésváltozástól függően), hogy az áram beálljon az új, nagyobb terhelési értékre. Egész pontosan ezt a funkcióját tudjuk hasznosítani ennek az elrendezésnek.

Tehát ennek a módszernek a pozitívuma, hogy míg statikus állapotban láthatatlan a körben, a dinamikus változások ellen hat, azaz nem engedi hirtelen megugrani, vagy leesni az áramot, ami zárlat esetében ideális, hiszen van idő arra, hogy a védelem, vagy egyéb automatika észrevegye a zárlatot, és eldöntse, beavatkozzon-e vagy se. A másik előnye, hogy ha jól van méretezve, nem igényel karbantartást, és nem is kell neki segéd táp, passzív módon, és minden időpillanatban figyeli az áramingadozásokat. A rezgőkör a működési elvéből következően korlátozza az áramváltozás gyorsaságát.

Ennek az elrendezésnek negatívuma is van, egyrészt ha megvizsgáljuk a 2. ábrát, azt vehetjük észre, hogy a generátor feszültsége fölé emelkedik a kondenzátor és a tekercs feszültsége, a jósági tényezőtől függően akár többszörösére is! Ráadásul 2 jósági tényezőt kell definiálnunk, az egyik a statikus állapotú tényező, a másik pedig a zárlati tényező, ahol:

$$Q_S = \frac{L\omega_0}{R_S}$$

$$Q_Z = \frac{L\omega_0}{R_Z}$$

és:

$$R_Z \ll R_S$$

ezért:

$$Q_S \ll Q_Z$$

Emiatt zárlat, vagy túlterhelés esetén, a kondenzátoron és a tekercsen eső feszültség is elkezd nőni. Ezt a 3. ábrán lehet látni, mi történik, ha elkezdjük csökkenteni a terhelőellenállás értékét, a kondenzátoron a feszültség nagyságrenddel is megnőhet. Tehát soros rezgőkör esetében nem csak jelen esetben, de mindig, a kondenzátort és a tekercset is a legnagyobb jósági tényezőre kell méretezni feszültségben, ami igencsak megnehezíti a dolgunkat, hiszen hálózati feszültség szinten is, több kV-os kondenzátorra van szükség, aminek a méretei, és ára nem éppen barátságos. Tehát az egész korlátozó, és a vele összekötött berendezések és generátorok biztonsága akkor garantálható, ha egész biztosan túl van méretezve a rezgőkör.

1.2 Gyors olvadóbiztosítós korlátozó

Az olvadóbiztosító elődjét már 1871-ben szabadalmaztatta Thomas Edison, ami egy ólom olvadószál volt, ezeknek az olvadóbiztosítóknak 2 feladatuk van, az egyik a névleges áram üzembiztos vezetése, a másik pedig a berendezések, vezetékek védelme a túláramoktól és zárlatoktól. Manapság a legtöbb helyen már megszakítókat használnak, mert az olvadóbiztosítót (a klasszikus) a kiolvadása után cserélni kell, ami egy késes verziónál nem éppen egy egyszerű és gyors folyamat, pláne, hogy csak szakember cserélheti. Ugyanakkor az áruk mégis kelendővé teszik őket, és a modern technika ellenére még mindig rengeteg helyen alkalmazzák őket, mint végső korlátozó elem, illetve vannak olyan berendezések, ahová egyáltalán nincs igény drágább megoldásra, vagy a feszültségforrás korlátozott zárlati teljesítményű (bár ebben az esetben sem szűgyen a biztosító használata).

Persze ebből is van rengetegféle jellegzőgörbéjű, karakterisztikájú, áramú, feszültségű, ebbe igazából nem is mennék bele túl részletesen, mert száz oldalakat lehetne írni róluk. Létezik azonban egy speciális változata, amely kiolvadás után képes visszaállítani a vezető állapotot, miután a terhelőáram megszűnt. Ez gyakorlatilag egy félvezető, termisztor jellegű eszköz

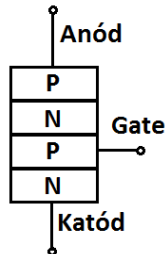
(tulajdonképpen a PTC is ilyen), amely a melegedés hatására megnöveli az ellenállását, így a rajta átfolyó áram csökkenni kezd. Amint lecsökkent az áram (lekapcsolt betáplálás, vagy kijavított zárlati hely), a félvezető visszaáll az eredeti vezető állapotába.

Az olvadóbiztosítók előnye tehát az egyszerűség, az olcsóság, és a megbízhatóság. Ugyanakkor problémás a használatuk, ha változó a terhelés a hálózaton, és esetleg gyakori a nagy transziens áram, pl. nagy motorok, transzformátorok indítása, ha nincs megfelelően nagyra megválasztva, akkor ezek a transziensek kiolvaszthatják, ugyanakkor, ha túl nagyra választjuk, akkor lehet, hogy zárlatra kiolvadnának, de túlterhelésre viszont már nem, ami okozhat akár nagyobb anyagi kárt is, mint a zárlat. Ezen kívül a működésükből adódóan a névleges kiolvasztó áramnak át kell folynia a biztosítón ahhoz, hogy a kiolvadás megtörténjen, azaz egy rövid ideig ugyan (lásd i^2t jelleggörbék), de a zárlati/túlterhelési áram megjelenik a hibahelyen/fogyasztón. Van ahol ez az idő éppen elég egy komoly anyagi kár keletkezéséhez, ezért kijelenthetjük, hogy az olvadóbiztosítók lassú berendezések, és a hőtehetetlenségüknél fogva nem képesek a zárlati áram azonnal való korlátozására.

Tehát, meglátásunk szerint, az olvadóbiztosítót kombinálva érdemes használni, mint utolsó védőbástya, más, gyorsabb megoldással.

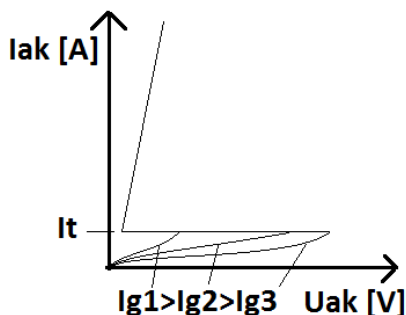
1.3 Félvezetős megoldások

Félvezetős megoldásnak nevezek minden olyan elrendezést, amelyekben valamilyen félvezető alkatrész szerepel. A tirisztor tulajdonképpen egy négyrétegű félvezető, p-n-p-n rétegekkel, ami önmagába véve egy nagy nyitófeszültségű diódát eredményez, ezért vagy a középső n, vagy a középső p rétegre rá van téve egy vezérlő elektróda (gate), ettől függően lesz a tirisztor n vagy p típusú:



6.ábra

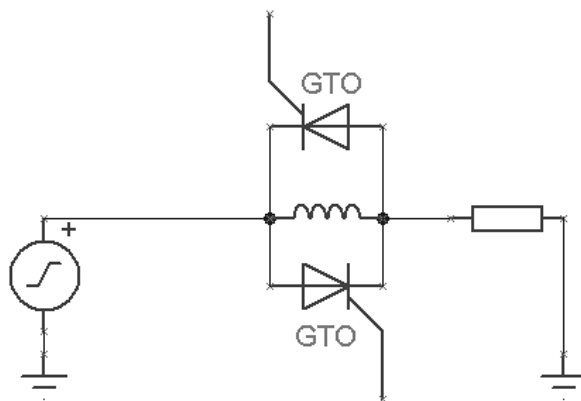
A nyitóirányú karakterisztikája:



7.ábra

A tirisztor sajátos tulajdonsága, hogy gateáram nélkül diódként viselkedik, de ha a gatera megfelelő nagyságú áramot adunk (5. ábrán I_{g1} -hez hasonlóan) a tirisztor anód-katód

átmenetének nyitófeszültsége jócskán lecsökken, ha az anódon pozitívabb a feszültség, mint a katódon, és ez egy anód-katód feszültségkülönbség megszűnéséig tartó, vissza nem billenthető állapotba hozza a tirisztort, ekkor mondhatjuk, hogy a tirisztor nyitott állapotban van. Az úgynevezett tartóáram (I_t) az, ami a tirisztort nyitott állapotban tudja tartani, és ameddig ez az áram fennáll, a gate gyakorlatilag hatástalan. Amikor az áram a tartóérték alá csökken, illetve nincs gatevezérlés, a tirisztor visszaáll az eredeti kikapcsolt állapotába. Tehát kijelenthetjük, hogy a tirisztort főképp kapcsolóüzemben használjuk. Nézzünk meg egy ilyen tirisztoros megoldást:



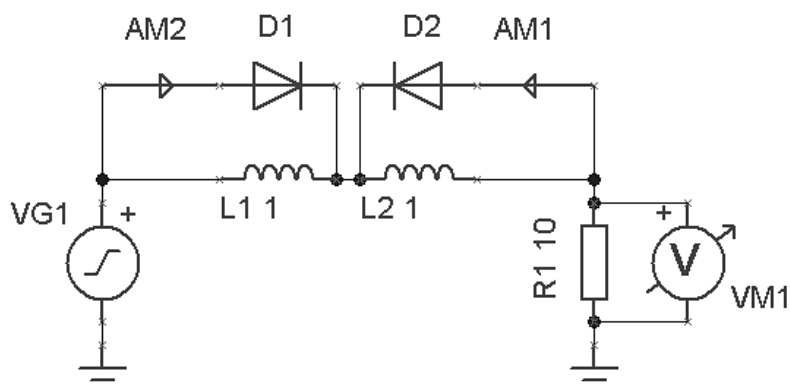
8.ábra

A kapcsolás működése elég egyszerű, normál állapotban a két GTO tirisztor (Gate Turn-Off) felváltva nyit, és üzemszerűen vezeti a terhelőáramot. Zárlat, vagy túlterhelés esetén a tirisztorokról levesszük a gyújtást, így az áram a tekercsre van kényszerítve, és mivel a tekercsen eddig a gerjesztés minimális volt (a két tirisztor szaturációs feszültsége esik a tekercsen), az áram azonnal lecsökken a tekercs áramának szintjéig, majd folyamatosan gyűrűzik fel a tekercs és a hibahely impedanciájának megfelelő szintig. A szinkron gyújtást, és a túláramérzékelést elég egyszerű megoldani itt, nem igényel különösebben sok többlet alkatrészt. A két GTO tirisztor helyett lehet normál tirisztorokat is használni, azonban ebben az esetben a túláram legalább egy félperiódusnyi ideig folyni fog.

Tehát ez a korlátozó alapvetően nagyon alacsony impedanciát mutat üzemszerűen, túláram esetén viszont egy tekercs iktatódik be a körbe, ami jócskán lelassítja az áram növekedési értékét.

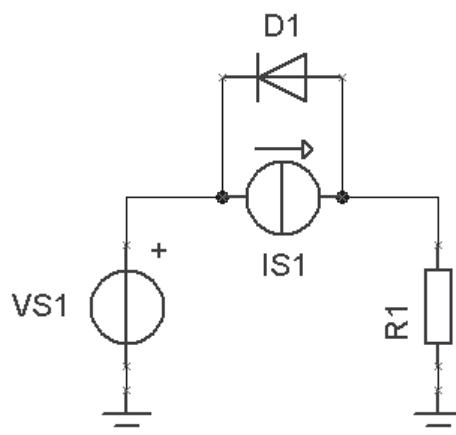
A hátránya a megoldásnak (GTO esetén) a hirtelen kapcsolás, ami okozhat kapcsolási tranzienseket a hálózat többi részében, és ameddig a vezérlőáramkör beállított értékét nem éri el az érzékelt szint, addig semmi sem korlátozza a kialakuló áramokat.

Egy másik megoldás, diódákkal:



9.ábra

Ez még szintén egy elég egyszerű kivitel, de működése bővebb magyarázatot igényel. Itt 2 diódás söntágunk van a két tekercsel párhuzamosan, így statikus esetben a hálózat minden félperiódusban csak 1 nyitóirányban előfeszített diódát lát, és egy tekercs ohmos ellenállását, mivel a tekercsen egyenáram folyik állandósult állapotban. Pozitív félperiódus során D_1 nyitóirányba lesz előfeszítve a generátor szemszögéből, így itt folyik a terhelőáram. Ugyanekkor viszont, mivel állandósult állapotról beszélünk, L_1 tekercsnek az árama is ugyan erre folyik, tekintve, hogy kapott gerjesztést, ráadásul az ellentétes irányból, a mágneses tere kezd összeomlani. A két áram együtt folyik át D_1 -en, onnan L_1 tekercs árama visszakanyarodik saját magára, azaz a tekercs saját árama egy zárt hurkot alkot önmagával és a párhuzamos D_1 -el. A terhelőáram ezután L_2 -n folyik keresztül. Ha minden tagot ideálisnak tekintünk, akkor a diódák folyamatosan nyitva vannak, és folyamatosan folyik rajtuk áram. Azonban a szaturációs feszültség miatt, illetve a tekercsek ohmos ellenállása miatt (ha nem szupravezető) a szinuszhullám feszültségmaximuma közelében az előfeszítésnek megfelelő dióda lezár. Hogy szemléletesebb legyen, vizsgáljunk meg egy diódás helyettesítő képet:



10.ábra

A tekercset egy áramgenerátorral helyettesítettük, a váltakozóáramú feszültséggenerátort pedig egy egyenáramúval. A tekercsnek a viselkedése okán tehattük meg, hogy áramgenerátor van helyette, ugyanis a tekercs 'megjegyzi' az előzőekben ráadott gerjesztés irányát, és a gerjesztés megszűnése, vagy megváltozása után is az eredeti gerjesztésnek megfelelő áramot, és áramirányt próbálja fenntartani. Azaz a tekercs nagyban hasonlít egy áramgenerátorra.

Ebben a kapcsolásban nincs indulóáram, azonnal létrejön a statikus állapot. VS_1 feszültséggenerátor itt R_1 ellenállást látja. Itt azonban nem lesz rögtön egyértelmű a helyzet, a dióda záróirányban van előfeszítve, az áramgenerátort pedig szakadásként helyettesítjük a szuperpozíció szerint, így látszólag nem lenne szabad áramnak folynia a feszültséggenerátortól a terhelés felé. Mi is történik tehát itt?

IS_1 áramgenerátor árama átfolyik D_1 diódán. Ha most felhasználjuk a szuperpozíciót, és a feszültséggenerátort rövidzárral helyettesítjük, akkor a terhelésre a dióda szaturációs feszültsége jut, és áram is folyik át rajta, mint egy áramosztó egyik oldalán. Ha most betesszük ide a feszültséggenerátort, a rajznak megfelelően, akkor az azzal egyenértékű, mintha a dióda nyitófeszültségéhez hozzáadnánk VS_1 generátor feszültségét, ezáltal nagyobb feszültség jut R_1 terhelésre. Azaz:

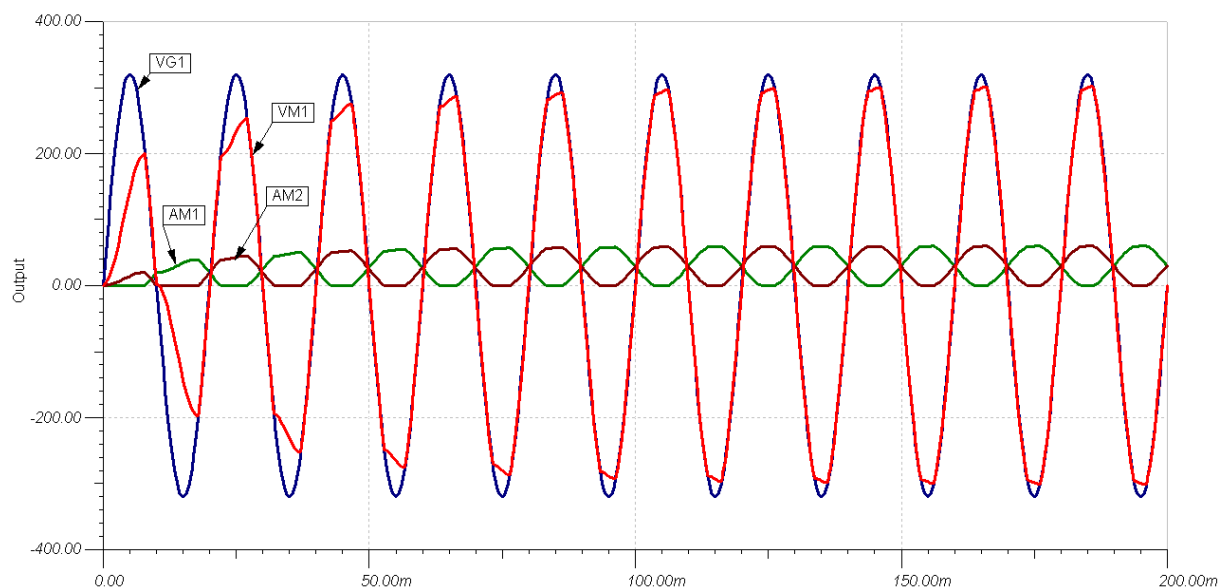
$$U_{R1} = U_{D1} + U_{VS1}$$

Tehát itt nem közvetlenül VS_1 generátor táplálja R_1 terhelést, hanem közvetett módon, az áramgenerátorral párhuzamos diódára záróirányban rákényszerített feszültség hatására az áramgenerátor az, ami valójában rádolgozik a terhelésre.

Ezen modell, és a valóságos között persze van különbség, főleg a tekercs/áramgenerátor részét illetően, de az elv az ugyan az. A tekercs esetén tehát mivel csökken a gerjesztőáram, sőt, meg is szűnik, a tárolt energiája már azelőtt csökken, mielőtt az újabb azonos polaritású félperiódus megérkezne, emiatt nem képes olyan ideális áramgenerátorként viselkedni, mint ahogy azt a szimulációban láttuk, ezért amikor ellentétes irányból a szinuszhullám csúcspontjához közel kerülünk, a tekercs nem lesz képes nyitva tartani a vele párhuzamos diódát, a feszültséggenerátor felől folyó áram miatt pedig megfordul a polaritás a tekercsen, és a dióda lezár a félperiódus csúcsáig. A csúcspont után, miután az áram elérte a maximumot a tekercsben, a tekercs saját árama nagyobb lesz, mint a terhelőáram, a dióda újra kinyit. Tehát tulajdonképpen azt kell figyelni, hogy a tekercs saját árama, és a terhelőáram pillanatnyi értéke mikor haladja meg a másikat. Amennyiben:

$$I_{\text{tekercs}} > I_{\text{terhelő}}$$

A dióda nyitva lesz. Ha a két áramérték azonos, vagy a terhelőáram nagyobb a tekercsáramnál, a dióda lezár, és a tekercsáram csak a terhelésen keresztül folyik tovább. Az indítási jelalakokat ezen az ábrán lehet nyomkövetni:

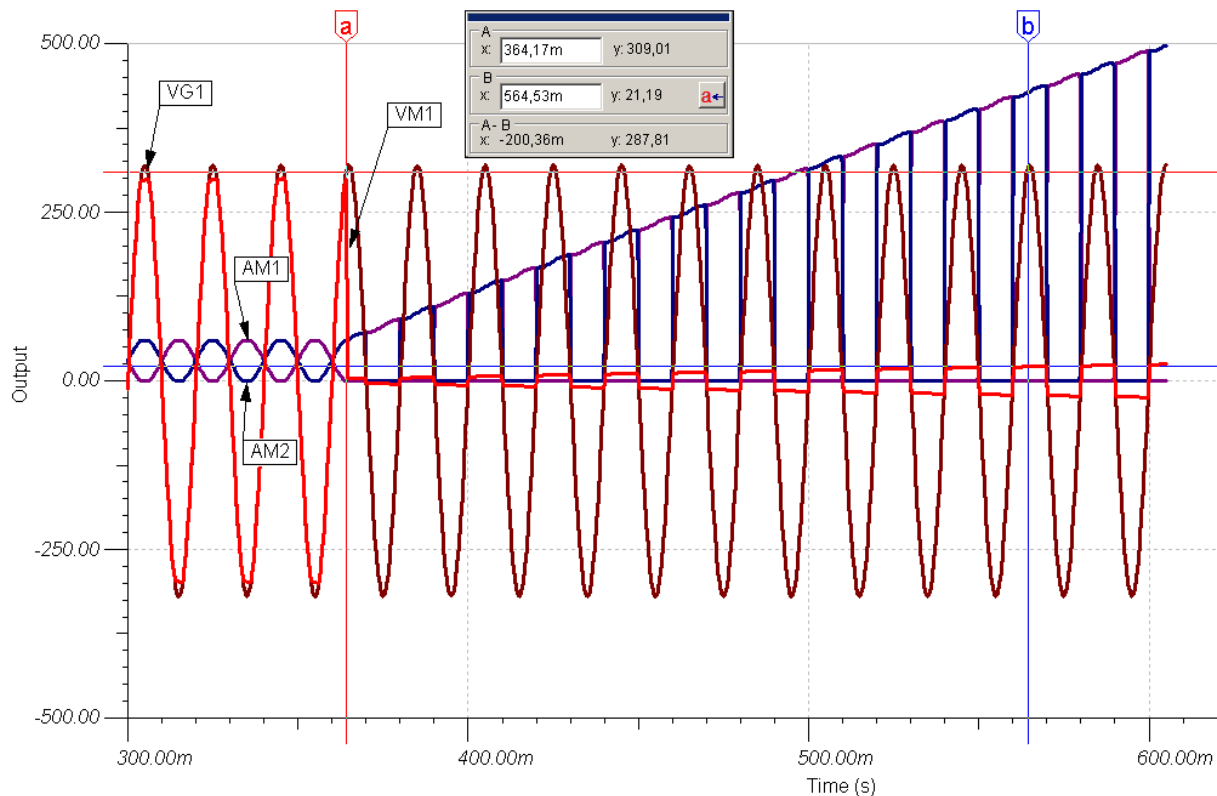


11. ábra

Az ábrán látni, hogy a diódák 80%-os kitöltésben vannak nyitott állapotban, 20%-ban pedig zárva (AM_1 és AM_2) az első periódusok során, a későbbiekben ez 92-8-ra változik, tulajdonképpen a szinuszcúcs legtetetejéhez közel zárnak csak le a diódák.

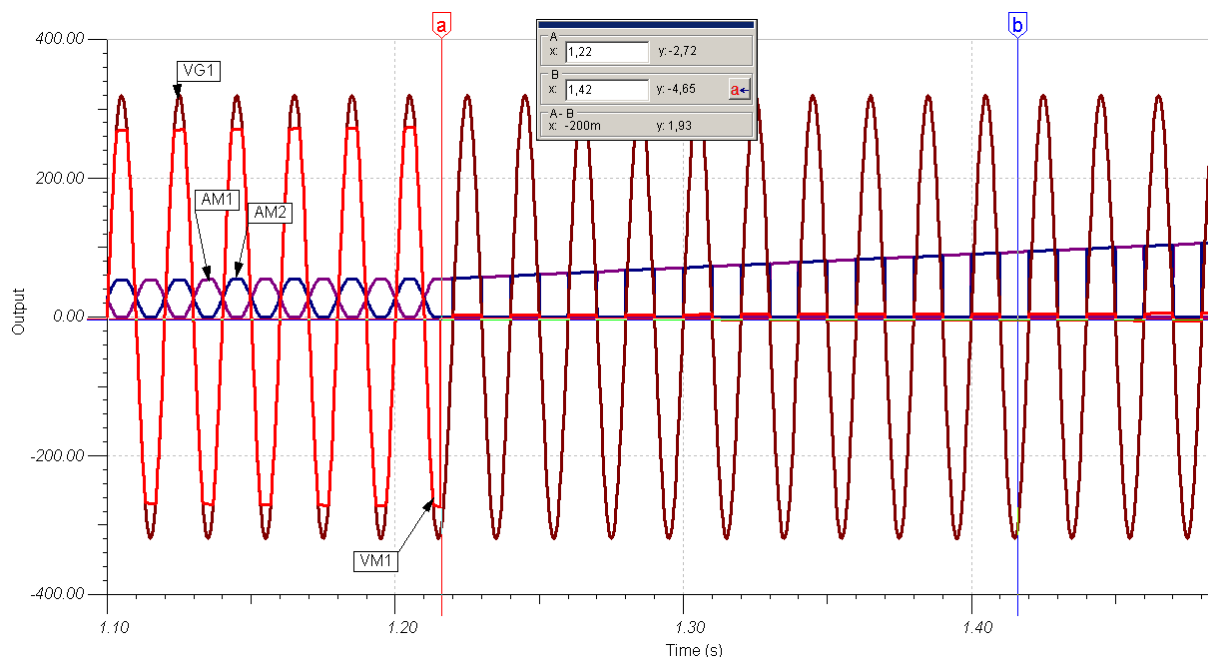
Zárlat esetén a statikustól eltérően viselkedik az áramkör. A zárlat bekövetkeztének pillanatában -ami tegyük fel, hogy most a pozitív félperiódusban van- D_2 dióda azonnal lezár, ennek az az oka, hogy a terhelésen leesik a feszültség, és a huroktörvény értelmében a maradék feszültség L_2 tekercsre és D_1 diódára jut, a diódán azonban a feszültség állandó, emiatt a tekercsre jut a teljes feszültség. Ez azt jelenti, hogy L_2 D_1 közös pontján olyan állapot áll elő, mint ami a statikus esetben, feszültségcsúcs közelében. L_2 tekercs így teljes mértékben sorosan beiktatódik.

Ha visszatekintünk a 10. ábrára, akkor ez az eset annak felelne meg, ha a diódát elvonnánk a körből. Így tisztán látni, hogy beiktattunk egy soros áramgenerátort. Az áramgenerátor pedig csak a saját áramát engedi a soros körben folyni. Persze itt egy valóságos áramgenerátorunk van, aminek ráadásul változik a belső vezetése (a tekercs gerjesztése nő), így a terhelőáram a tekercs nagyságának, és a terhelésváltozás különbségének függvényében gyorsan vagy lassan, de nőni fog. Szerencsére mindkettőtől lineárisan függ, így itt egyszerű dolgunk van. Nézzük meg zárlat esetén hogy alakulnak a feszültségek és áramok:



12.ábra

A zárlat bekövetkeztének pillanata 364ms-nál van, ekkora nagyjából már kialakult az állandósult állapot. Itt jelenleg a 2 tekercs inductivitása 100-100mH. A VM₁-el jelzett görbe a terhelésen eső feszültség, az eredetileg 10 ohmos terhelést 364ms-nál egy kapcsoló segítségével 100mohm értékre lett csökkentve, azaz a század részére. Jól látni, hogy a zárlat pillanatában azonnal leesik a feszültség 3,23V-ra a szimuláció szerint, ami 32,3A áramot jelent (csúcsérték!). Ha átszámoljuk a 10ohmos statikus esetben az áramot, $320V/10ohm=32A$ -t kapunk. Az előzőekben elmondottakból kifolyólag az áramkör működését a szimuláció is alátámasztotta, azaz a zárlat pillanatában a kapcsolás áramgenerátorként viselkedik. A VM₁ görbét követve látható, hogy a terhelésen a feszültség folyamatosan nő a zárlat pillanatától kezdődően, a kezdeti 3,23V-ról 10 periódusnyi idő múlva a feszültség 21,19V-ra megy fel, ami 211A áramot jelent csúcsban. Az áramnövekedés üteme (ha pl. az effektív értéket nézzük) egy RL kör feltöltéséhez hasonlít, aminek éppen az az oka, hogy a DC körben egy tekercsünk és egy ellenállásunk van, amin hirtelen megugrik az egyenpotenciál. Tehát, ha megnöveljük a tekercs inductivitását, akkor ennek hatással kell lennie az áramnövekedés gyorsaságára a hibahelyen. Nézzük meg ha 100mH helyett 1H tekercseket használunk, milyen eredményt kapunk:



13.ábra

Rögtön szembetűnő AM1 és AM2 árammérők által mutatott lassú áramnövekedés. A VM₁-el jelzett terhelésen eső feszültségnél is kimérhető az előbbi gondolat, számszerűsítve, a zárlat pillanatában -2,72V-ot kapunk csúcsban, 10 periódusnyi idő múlva ez az érték -4,65V. Azaz az áram arányaiban mindösszesen 1,7x lett nagyobb, mint a zárlat pillanatában. Az előző, 100mH-s esetben ugyan ez az érték 6,56x volt. Ha a jelalak különbségtől eltekintünk, akkor durván 5x kisebb energia jutott arányaiban a zárlatos helyre 200ms alatt.

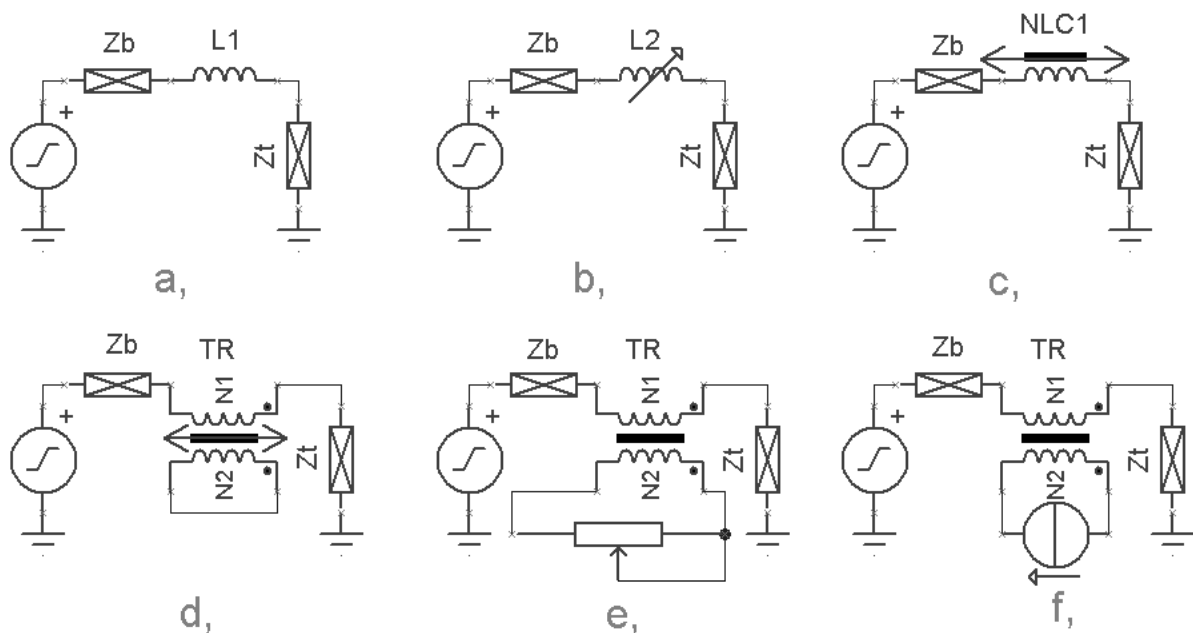
Fontos megjegyezni, hogy ugyan a tekercs induktivitásával, és a gerjesztőáram növelésével lehet növelni a tekercsben tárolt energiát, de a tekercs energiája soha nem lesz elég arra, hogy a diódát a feszültségcsúcs tetején is nyitva tartsa. Ennek oka a dióda szaturációs feszültsége, illetve a tekercs saját vesztesége a két azonos polaritású félperiódus között. Ez megmutatkozik a kimenő jelalakban is, a szinuszhullám kissé torzul a nullátmeneti pontoknál. A torzulás értéke ugyan nagyon csekély, de mégis jelen van, ráadásul periodikusan, illetve az áramátmenetek között még intenzívebb. De ha megnézzük a fogyasztókat, akkor a legtöbb esetben ez nem okoz problémát, viszont a diódák szórása miatt apró asszimetria alakulhat ki, ami miatt kisebb zérus sorrendű áram folyik a nullvezetőben 3 fázisú rendszer esetén. Az áramkörben a diódákon pedig az effektív áramérték a csúcsárammal egyenlő, ezt figyelembe kell venni méretezéskor.

Összefoglalva: az áramkört statikus esetben nem látja a hálózat, nagyon egyszerű a felépítése, nem igényel karbantartást, gazdaságos, ugyanakkor a működési elvéből kifolyólag korlátozza az áramváltozás sebességét, így a zárlati áramokat is.

Negatívuma lehet a fentebb említett torzítás miatt fellépő jelenség.

1.4 Egyéb módok

Mint ahogy azt a 4. oldalon említettük, a korlátozási módok egyik fő koncepciója egy soros elem, ami ellátja az áramcsökkentés (vagy áramváltozási sebességsökkentés) feladatát. Az előzőekben tárgyalt módokon kívül még nagyon sok megoldás van, ezekből az egyik legfontosabb a fojtózás, vagyis soros induktivitás elhelyezése a védendő kör elé. Egy önmagába vett fojtótekercs elég sok feltételnek nem tesz eleget a dolgozat elején említett pontok közül, főképp annak, hogy üzemi körülmények között nulla legyen az impedanciája, és a fázistolása. Ugyanakkor az egyik legegyszerűbb módja ennek a feladatnak a megvalósítására. De koncepcióját tekintve nem csak egy szimpla soros tekercs láthatja el ezt a feladatot, hanem többféle elrendezésben használva, különböző kiegészítő funkciói lehetnek:



14.ábra

Az 'a' változat a normál fojtózás. A 'b' egy állítható fojtó, 'c' állítható magos fojtó, 'd' mágneses erősítő, 'e' állítható terhelésű trafó, 'f' szaturációs reaktor.

Az első két esetben is lehet valamilyen vasmagot használni, ugyanakkor a vasmag több problémát is okozhat, egyrészt kell a lemezelt vasanyag hozzá, valamint szigetelések, és a mag be tud telíteni. A légmagos ezzel szemben sosem telít, viszont ugyan akkora induktivitáshoz jóval több menet kell, ezáltal több réz, nagyobb helyet foglal el, viszont sokkal egyszerűbb szigetelni. A 'b' típusnál el lehet képzelni akár egy szabályozható toroid autótrafót is, ami sorosan van bekötve, nulla impedanciát is be lehet állítani. A 'c' típusnál csak a mag helyzetét változtatjuk, ezáltal a tekercs induktivitása is változik, itt viszont nem 0-ról indul a szabályozás, hanem a légmagos tekercs induktivitásától. A 'd' esetben egy hegesztőberendezéseknél használt megoldás van bemutatva, itt több paraméter is változik egyszerre, a csatolás, és a primer oldal által látott szekunder oldali terhelés. Az 'e'-nél a primer oldal által látott terhelést lehet változtatni. 'f' esetben egy áramgenerátor segítségével szándékosan telítésbe visszük a trafót, ezáltal lecsökken a primer oldali impedancia.

Ezen megoldások közül persze nem mindegyiket használjuk gyakorlatban, inkább csak koncepciótervekként vannak megemlítve.

Az egyéb módok közé sorolnám még a különböző szupravezetős kialakításokat. A szupravezetők sajátos tulajdonságai okán alkalmazhatók erre a célra. Ha 3 feltétel teljesül, akkor bizonyos anyagok, illetve vegyületek, abszolút 0 ellenállással fognak rendelkezni. A szupravezetőknek több generációja van, a generációkat főként a szupravezetési hőmérsékleti határ alapján különböztetjük meg. Az I. generációsak 10K alatt mutatnak csak ilyen tulajdonságot (pl. higany, alumínium), de bizonyos nagyságú H mágneses térerő felett sima vezetőként fognak funkcionálni. Ezeket manapság ritkán használják, mivel nagyon költséges folyékony héliummal kell őket hűteni, aminek a szállítása és tárolása nagyon nehézkes (vákuumozott falak, közte folyékony nitrogén, majd újabb vákuumozott falak), a helybeli előállításához pedig nagyon komoly több lépcsős hűtőberendezésre van szükség. A II. generációsak rendelkeznek egy kevert fázissal, ami egy bizonyos mágneses térerő felett alakul ki, és ha egy újabb határértéket átlép a térerő, akkor szűnik meg a szupravezetés (pl. nióbium, technécium). Az újabb generációkat inkább magas hőmérsékletű szupravezetőknek hívjuk, mivel nincs szükségük folyékony héliumra, a legtöbbnek már tökéletesen elég a folyékony nitrogén (-195°C), az egyik leginkább használt anyag az YBCO (Ittrium bárium rézoxid, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$), éppen e hőmérséklet felett lesz szupravezető. Nagyjából 250T-s indukcióig (párhuzamos térerővonalak) megtartja állapotát. Ezen kívül még rengeteg féle típus van (talán több száz is), mindegyiknek valamelyest más tulajdonságai vannak, emiatt sok esetben nem is csereszabatosak [1].

Tehát eddig két feltételünk van, az egyik a hőmérséklet, a másik a kritikus mágneses térerő. Van egy harmadik is, ez pedig az áramsűrűség. A térerő általában előbb meghaladja a kritikus értéket, azonban bifiláris tekercselés esetén a két gerjesztés egymás ellen hat, így az áramsűrűség fogja limitálni a szupravezetést.

A mi célunknál az utóbbi kettő az, ami fontos. Ha ugyanis egy soros elemként beiktatunk egy ilyen szupravezetőt egy hálózatba, és úgy méretezzük, hogy a névleges áram, vagy a maximális terhelőáram által létrehozott térerő még a kritikus érték alatt maradjon, a szupravezető mint ideális vezető jelen lesz a körben. Amint az áram meghaladja a kritikus értéket, a szupravezetési állapot összeomlik, ekkor a körbe egy ellenállás iktatódik be, ami rögtön lekorlátozza az áramot, és lehetőleg gyorsan le is kell kapcsolni (tehát nem célszerű tartani a zárt állapotot), mert ilyenkor már a szupravezető anyag elkezd forrósodni, és a folyékony nitrogén gyorsan elkezd párologni.

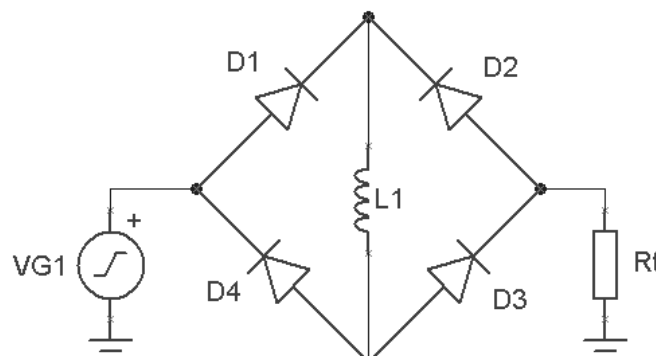
Ennek a módszernek az előnye, hogy a szupravezetési állapot összeomlása automatikusan bekövetkezik, így nem alakul ki a teljes zárlati áram.

A hátránya, hogy jelenleg még mindig túl alacsony hőmérsékleten kell tartani ezeket az anyagokat, amikhez többnyire helyi hűtőberendezés kell (nitrogén cirkuláció), ami közvetett módon, de veszteséget jelent, nem utolsósorban maga a szupravezető is még nagyon drága nagy mennyiségben, így igazából gazdaságilag ez nagyon nagy beruházás, illetve elég nagy helyet foglal el, emiatt nagyon lekorlátozódik a használhatósági területe. Azonban ha megjelennek a szobahőmérsékletű szupravezetők, akkor ez könnyen megváltozhat.

2. Híd típusú túláram-korlátozó [2]

2.1 Szimulációk, számolások

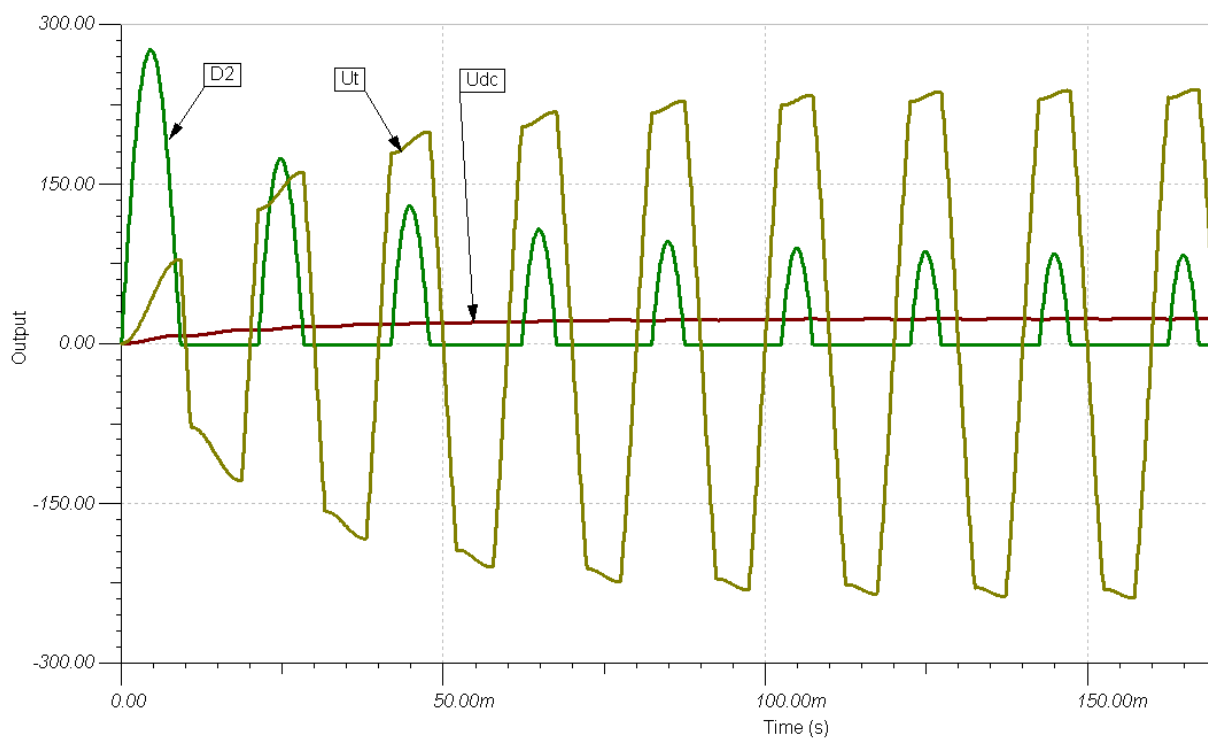
Az előzőekben megtettük a különböző módok áttekintését. Ezek közül a diódás, 9. ábrán láthatót vesszük a figyelem középpontjába. Ennek az az oka, hogy ez felel meg leginkább az ideálisnak deklarált korlátozónak, mind a 10 pontnak többé-kevésbé megfelel. Azaz a $\cos\phi$ -je 1 állandósult állapotban, a terheléshez képest nagyon kicsi a feszültségesése (dióda szaturáció+ tekercs ellenállás), rögtön 'észleli' a hibát, az áram nem tud hirtelen megugrani a korlátozó után, bármilyen közeli vagy távoli a zárlat, ugyan úgy működőképes. A hálózatba iktatás után folyamatosan működik, nincs szüksége segéd tápra (esetleg csak a hozzá kapcsolt védelemnek). A működésével nem zavarja a hálózat többi részét, a nullátmeneti zavarokat szűrőáramkörrel minimalizálni lehet, zárlat esetén pedig nem okoz feszültségsökkenést. A hiba után, miután a tekercs saját árama lecsökken a terhelőáram értéke közelébe, az áramkör visszaáll az eredeti üzemi statikus állapotába, és ezt bármennyiszer (sőt akár periodikusan is) el tudja viselni. Könnyen beépíthető, akár még üzem közben is, szereléskor áthidalva a megszakítandó részt, ahová a berendezést sorosan be kell iktatni. Felépítését tekintve nagyon egyszerű, és nagyon olcsónak tekinthető. Jelet tud szolgáltatni a védelem számára, itt 2 figyelőellenállást kell beiktatni a 2 hurokba. Ezek okán érdemes ezzel tovább kísérletezni, fejleszteni. Egy fázis esetén láthatóan 4 elemből áll a kapcsolás, azonban 3 fázisnál $4 \times 3 = 12$ elemű lenne. Itt a diódák párosával (1 tokban) 17 ezer forintba kerülnek (2012, Farnell), ezek 600V és 400A-esek, és 1,62V a szaturációs feszültségük. Ugyan ezt az elvet felhasználva egy hidat is képezhetünk:



15. ábra

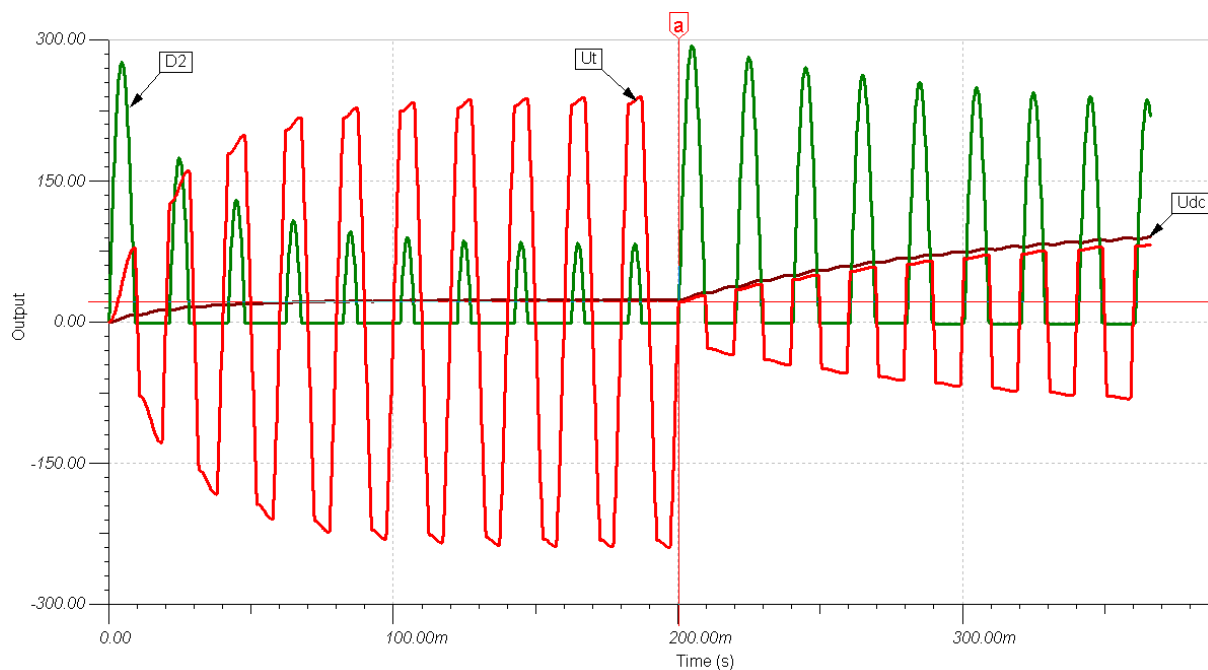
Ez tulajdonképpen nem más, mint egy, az AC körbe sorosan beiktatott graetz híd. Itt egy kettős áramnem átalakítás történik, akár hívhatnánk AC-DC-AC megoldásnak is. A megoldás elve megegyezik a 9. ábrán látható kapcsolásával, azonban itt egyetlen tekercsünk van csak, ami mind a pozitív, mind a negatív félperiódusban kap gerjesztést. Röviden a működése: Statikus állapotban, nem ideális esetben a diódák folyamatosan nyitva vannak, kivéve a csúcshőfeszültség közelében, ekkor ugyanis a tekercsáram kisebb lesz a terhelőáramnál, és a tekercs aktív üzemmódból átvált passzívba. Ekkor a diódák kezdenek inkább normál (tekercs nélküli) üzemszerűen nyitni és zárni, amíg vagy meg nem szakítjuk a kört, vagy nem esik vissza az áram a tekercsáram alá. Az első verzióhoz képest az az egyik legnagyobb előnye, hogy elég 1 ugyan akkora tekercs, mint a másiknál, tehát az ár rögtön a felére esik. Diódából viszont dupla annyira van szükség, de többnyire a diódák olcsóbbak.

Nézzük meg a bekapcsolási jelalakokat:



16.ábra

$L_1=200\text{mH}$ és $R_T=10\text{ohm}$ esetén. Itt látható D_2 feszültsége is, ahogy egyre közelebb kerülünk a statikus állapothoz, egyre hosszabb ideig van nyitva. Azt ugyanakkor meg kell jegyezni, hogy ahhoz, hogy ilyen sima UDC-hez hasonlóan sima áram folyjon a tekercs körében, megfelelő gerjesztőáramra is szükség van. Zárlatos esetben:



17.ábra

U_T görbe a terhelésen eső feszültség. A terhelés 10ohm, a zárlati ellenállás 1ohm jelen esetben. U_{DC} a tekercsen folyó áram. Jól megfigyelhető, mennyire hasonló a 0ms és a 200ms-os pillanatban a terhelés jelalakja. Mind a terhelés feszültsége, mind a tekercsen folyó áram, és a diódákra jutó zárófeszültség-csúcs burkológörbéje egy jól meghatározott függvény alapján változik:

$$u_i(t) = 1 - e^{-\frac{t}{L/R_0}}$$

Ahol t – felfutási határérték
 T – időállandó
 R_0 – üzemi ellenállás
 L – tekercs induktivitás

Itt az időállandó nem más, mint egy tekercsből és egy ellenállásból álló R-L kör τ időállandója, ahol a tekercs a DC körű tekercs, az ellenállás pedig a zárlati (vagy üzemi) ellenállás és a tekercsellenállás összege:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Ez a függvény jellemzi a terhelésen eső feszültséget és a tekercsen folyó áramot bekapcsoláskor. Zárlat esetén ez a függvény el lesz tolva az üzemi áram effektív értékével, valamint jóval nagyobb időállandója lesz a lecsökkent zárlati ellenállás miatt:

$$u_z(t) = 1 - e^{-\frac{t}{L/R_z}} + |I_{eff}|$$

Ahol R_z – zárlati ellenállás

Itt az áram értékével van csak eltolva a függvény.

A diódákra jutó zárófeszültség épp ellentétes meredekségű, indulásnál:

$$u_i(t) = 1 + e^{-\frac{t}{L/R_0}}$$

Itt a ' t ' az, ami meghatározza közvetett módon, hogy mennyi ideig vannak a diódák zárt állapotban. Ha nagyobb a csúcsfeszültség, akkor tovább, ha kevesebb, akkor rövidebb ideig. Zárlatnál annyiban lesz másabb a tekercsáramhoz képest, hogy nincs konstans eltolása:

$$u_z(t) = 1 + e^{-\frac{t}{L/R_z}}$$

Ennek az az oka, hogy a diódára jutó záróirányú feszültség limitált a hálózati feszültség értékéig. A tekercsáram esetében a torzabb jelalak azért lehet, mert a tekercsnek az indulás pillanatában semmi gerjesztése nincs, és a diódák szaturációs feszültsége is összemérhető a 0, vagy pár V-os szinttel.

Most nézzük meg, hogy számolható a zárlat bekövetkezte utáni időben a zárlati pontra jutó energia. A zárlat pillanatában, mint korábban vizsgáltuk, az áramgenerátoros mód miatt a terhelőáram a normál üzemi áram értékével egyezik meg. Minden további pillanatban a

második képlet szerint változik a terhelőáram értéke. Ha ezt egy meghatározott időre vesszük, és integráljuk, akkor egy i^2t értéket kapunk, amit megszorozva a hurokellenállással, megkapjuk az energia egyik összetevőjét:

$$E_{tranziens} = \int_{t_1}^{t_2} \left[\left(1 - e^{-\frac{t}{L/R_Z}} \right) \sin \omega t \right]^2 dt * R_Z$$

Ahol R_Z a zárlati hurokellenállás.

Ez csak a tranziens része az energiának, az energia másik része a normál szinuszos üzemi áram és a zárlati hurokellenállásból adódó teljesítmény időre vetítve.

$$P_{üzemi} = I_{üzemi}^2 * R_Z$$

$$E_{üzemi} = P_{üzemi} * t[s] [Ws]$$

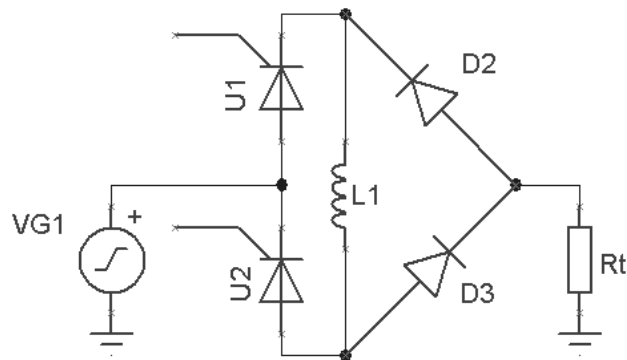
Az utóbbi esetben tehát az eldisszipált energia lineárisan függ az időtől, és az üzemi teljesítménytől (ami nem egyenlő a statikus állapotban a terhelés teljesítményével, mert ide a zárlati hurokellenállást helyettesítjük a normál terhelőellenállás helyett!). E kettő energia összege adja a zárlati helyi összenergiát:

$$E_{össz} = E_{tranziens} + E_{üzemi}$$

Ha már az első periódusban lekapcsolunk, ez alig lesz nagyobb, mint $E_{üzemi}$ viszont egy ponton $E_{tranziens}$ eléri, és le is hagyja $E_{üzemi}$ -t. 't' értéke több dologtól függ, de főként a mögöttes hálózat zárlati teljesítményétől, illetve a zárlati hurokellenállástól.

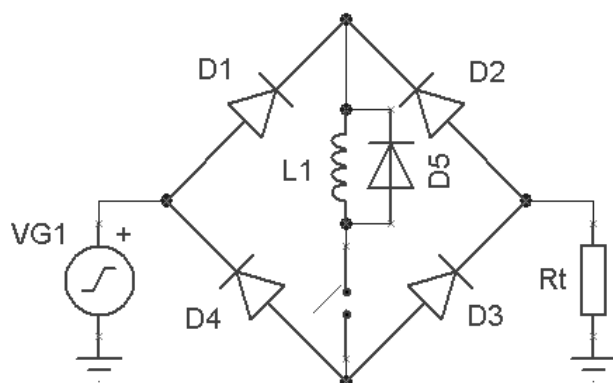
2.2 Megszakítási lehetőség

Amiről eddig nem volt szó, az az a lehetőség, hogy a zárlati áramot meg is szakítsuk az áramkörünkkel. Legegyszerűbb esetben a körben van egy megszakító, vagy olvadóbiztosító, így egy bizonyos értéknél kioldás/kiolvadás történik. Ez az AC körben sorosan elhelyezett berendezés, aminek a korlátozó ad parancsot a kioldásra. Az áram, amit meg kell szakítani az éppen aktuális terhelőáram értéke, azaz az üzemi+tranziens. De próbáljuk meg megoldani másképpen. Nézzük meg hogy hány helyen vagyunk képesek egyáltalán arra, hogy megszakítsuk az áramot. Az első az előbb említett AC köri megoldás. A második megoldás lenne, ha a hídban legalább 2 diódát tirisztorra cserélnénk:



18. ábra

Itt már is kaptunk egy újabb lehetőséget arra, hogy megszakítsuk az áramkört, mégpedig a 2 tirisztorral. Ha ugyanis levesszük róluk a gyújtást, a legközelebbi időpillanatban, mikor záróirányban lesznek előfeszítve (ami minden azonos polaritású félperiódusban van), a tirisztorok lezárnak. Először az egyik (ha pozitív félperiódusban zárunk, akkor a rajzon U_2), aztán a másik félperiódusban a másik, így teljesen megszakítottuk a kört. A tekercsben tárolt energia pedig D_3 - D_2 diódán keresztül kisül. Ha ezt egy kicsit átrendezzük, akkor az ötlet adhat egy újabb megoldáshoz:



19. ábra

Itt tulajdonképpen ismét visszatettük a diódákat, és a tekercsrel párhuzamosan beiktattunk egy ötödiket. Ha az ötödik dióda nyitófeszültsége kisebb, mint D_1+D_4 , illetve D_2+D_3 -é, akkor a tekercs saját árama csak D_5 -ön fog folyni, a többi dióda normál egyenirányító hídként viselkedik. Látszólag nem egy bölcs dolog, hiszen minden ember, aki tanult kapcsolástechnikát, tudja, hogy DC áramot sokkal nehezebb megszakítani, mint AC-t, tekintve, hogy nincs nullátmenet, a keletkező ív nem alszik ki egy pillanatra sem magától. Itt azonban segítségünkre van az extra dióda. Tegyük fel, hogy normál üzemi körülmények között szakítjuk meg a DC köri megszakítót. Ha D_5 nyitófeszültsége kisebb, mint a többi diódáé páronként, a kapcsolón nem tiszta egyenáram fog folyni, hanem lüktető egyenáram, ahol az érték az üzemi áram effektív értékével lesz egyenlő. Tehát elértük, hogy legyen nullátmenetünk. Ha tehát a kapcsoló helyére egy tirisztor teszünk, és levesszük róla a gyújtást, az első nullátmenetnél le fog kapcsolni. Na de tegyük fel, hogy nekünk lassú az 1 félperiódusnyi idő, és mi azonnal le szeretnénk kapcsolni a terhelésről a táplálást. Ez esetben, ha a legrosszabb esetet nézzük, a szinusz csúcsát, a kapcsolóelemen $I_{üzemi} \cdot \sqrt{2}$ áram fog folyni.

Ezt szeretnénk megszakítani rögtön. Tegyük is meg, a csúcsáramon megszakítottuk a DC kört. Ekkor L_1 tekercsen egy nagy feszültségimpulzus keletkezik, amilyen gyors a megszakító di/dt -je, olyan gyors lesz a tekercs feszültségnövekedése. Ez persze függ az induktivitástól is:

$$u_l = L \frac{di}{dt}$$

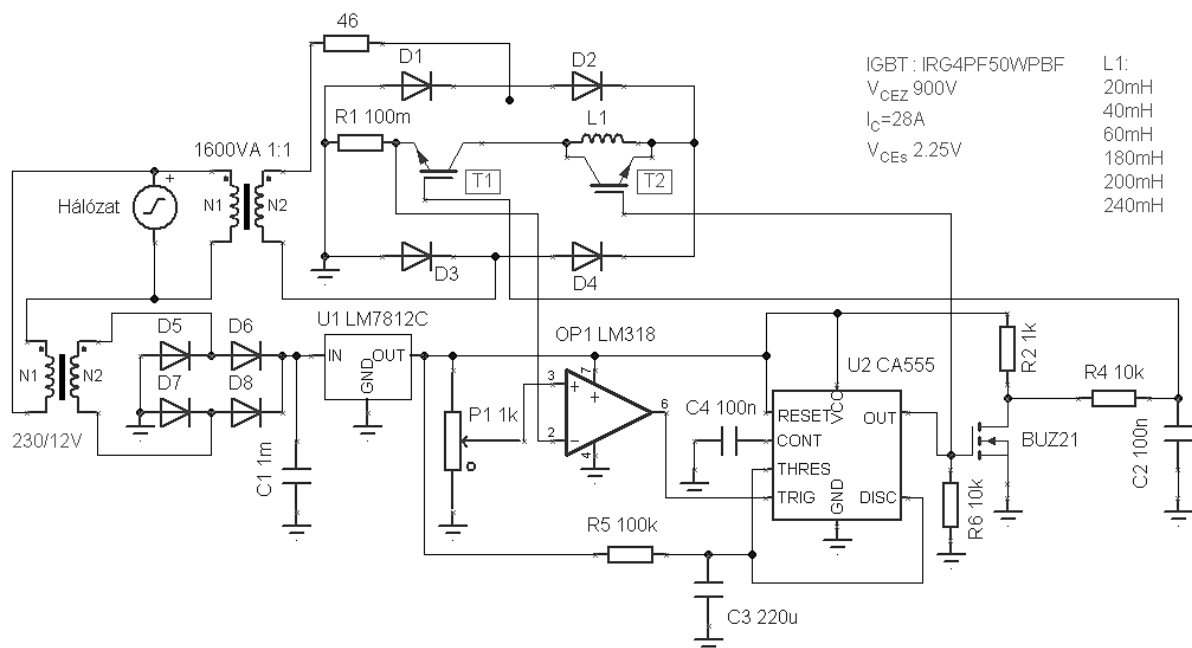
A rohamosan emelkedő feszültség azonnal kinyitja D_5 -öt, és az lesöntöli a tekercset. Ha a dióda gyors, és elvisel nagy impulzusáramot, akkor a tekercs teljes energiája kislül a diódán keresztül. A tekercs energiája:

$$E_{tekercs} = \frac{1}{2} L * I^2$$

Ahol I a tekercsen kikapcsoláskor folyó effektív áram (ami tulajdonképpen a normál üzemi áram csúcértéke). Ekkor a kapcsolóelemre csak egy rövid idejű tranziens tüske jut, az áram nagyon gyorsan megszakad, viszont se a hálózat felé, se a terhelés felé nem keletkezik semmiféle zavar, tekintve, hogy D_5 dióda lesöntölte. Tehát kaptunk egy olyan kapcsolóberendezést a korlátozó belsejében, ami azonnal képes megszüntetni a táplálást, ugyanakkor önmaga nem okoz zavarokat. A hálózat többi része, szórt induktivitások persze erre reagálhatnak feszültségnövekedéssel, ezért nem célszerű hirtelen teljesen 0-ra megszakítani az áramot a körben.

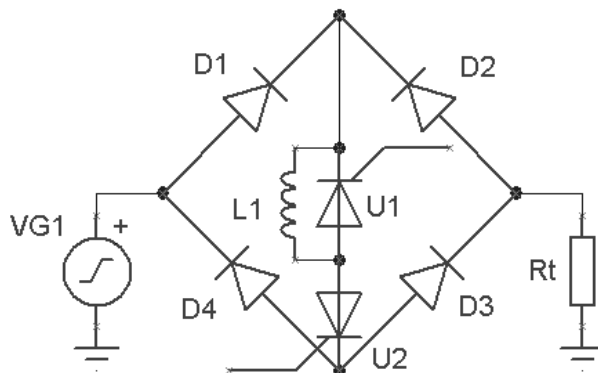
2.3 Egy gyakorlati elrendezés vizsgálata

Az elméletből készült egy valós modell, azonban idő hiányában nem tudtunk minden mérést elvégezni, amit elterveztünk, azonban a tervekről részletes leírást tudunk adni. Az előző oldalon a megszakítási lehetőség egy nagyon hasznos kombinált eszközt adott a kezünkbe, azonban a hirtelen megszakítás (ahogy vákuummegszakító esetén is) a hálózat többi részénél okozhat tranziens feszültségnövekedést, amit szeretnénk elkerülni. Ennek érdekében a megszakítást nem szabad azonnal elvégezni, kell biztosítani egy átmeneti állapotot. Ennek az eredménye az lesz, hogy a kapcsolóelemünkre is jut a tekercs energiájából, nem csak a tekercs (ellenállása) és a dióda fog disszipálni. A kapcsolóelemnél több variáció is lehetséges, mi egy kis teljesítményű IGBT-t választottunk, főként azért, mert nem igényel nagy energiát a ki és bekapcsolásuk, ezért a hozzá tartozó elektronika akár a hálózathoz osztással kapott tápfeszültséget is kaphat, így megspórolhatunk egy transzformátort. A tervben azonban szerepel egy kis trafó, ennek az oka hogy így egyszerűbb volt tesztelni a felépítést (és a méréshez is adott lett a galvanikus leválasztás). A söntölő dióda helyett is IGBT van beépítve. Emelett azért döntöttünk, mert a hálózati graetz hídban lévő diódák nyitófeszültsége 1V, így 2 diódán már 2V esik, ha pedig 1 gyors dióda lenne betéve sönt tagnak, akkor a teljes tekercsáram rajta keresztül folyrna, így azt is bordára kéne szerelni. Egy IGBT esetén viszont mi döntjük el, hogy mikor nyisson. Így tehát ráérünk akkor kinyitni ezt, ha le szeretnénk kapcsolni. Mivel a bekapcsolási ideje nagyjából 26ns, a késleltetése pedig 29ns, így 60ns alatt teljesen nyitott állapotba kerül a parancskiadást követően, ez pedig kellően kicsi, gyakorlatilag elhanyagolható. Nézzük a hozzá tartozó rajzot:



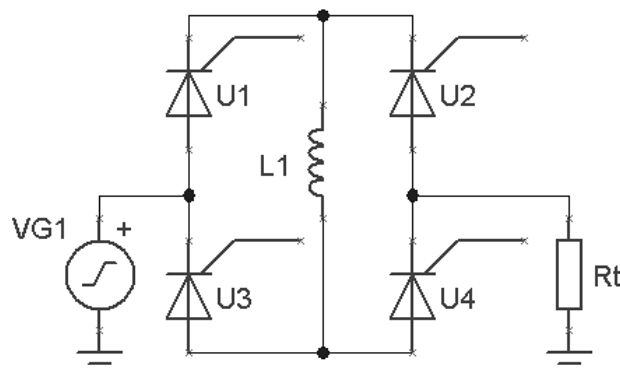
A hálózat felé egy leválasztótrafó lett betéve, amiatt, hogy az oszcilloszkóp galvanikusan el legyen szigetelve a fázistól. A fojtótekercs egy régebbi gyártású változat, 20mH-240mH-ig állítható az induktivitása, és 8A-es. R1 ellenállás 100mohmos és 20W-os, tulajdonképpen nagyobb áramok esetén akár a század értékű is elégséges. 8A esetén a disszipációja 6,4W. Sorban haladva az áramkör egyes részei: P1 potenciométerrel állítható be az áramhatár. Ezt egy LM318-ból felépített komparátor figyeli. Alapesetben a komparátor kimenete pozitív tápfeszültségen van. Ha az áram csúcserőke egy pillanatra is meghaladja a beállított értéket, a komparátor feszültsége 0-ra esik. Az 555-ös időzítő IC-vel felépített monostabil multivibrátor lefutás esetén bebillen, és R5*C3 ideig tartó magas szintet ad a kimenetén. Alapesetben T1 IGBT vezet, és T2 zárt állapotban van. A monostabil bebillenésekor T2 és BUZ21-es FET azonnal kinyit. BUZ21 egyben földpotenciálra teszi T1 gate-jét, azonban itt egy RC tagot találunk. Ennek feladata, hogy T1 kikapcsolását késleltesse. Tehát amikor már T2 nyitott állapotban van, T1 még csak akkor kezd lezárni. A tekercs saját árama így T2-n folyik, a terhelőáram pedig T1-en. Ahogy elkezd C2 (és a gatekapacitás) kisülni, T1 elkezd lezárni, ezzel együtt a terhelőáram rohamosan csökken. Így tehát elértük, hogy ne hirtelen történjen a kikapcsolás. Így viszont mind T1-et mind T2-t bordára kell szerelni, és nagyon figyelmesen kell megválasztani a típusukat.

Amennyiben nem szükséges azonnali lekapcsolás, IGBT-k helyett is használhatunk tirisztorokat:



U2 tirisztornál gyakorlatilag csak egyetlen gyújtóimpulzusra van szükség bekapcsoláskor, utána folyamatosan nyitva van, ha a tekercsgerjesztés meghalad egy bizonyos áramot. U1 tirisztort az előzőekhez hasonlóan először bekapcsoljuk hiba esetén, így U2-n lüktető egyenáram fog folyni. Ez esetben U2 az első nullátmenetkor le fog zárni, megszakítva ezzel a DC kört.

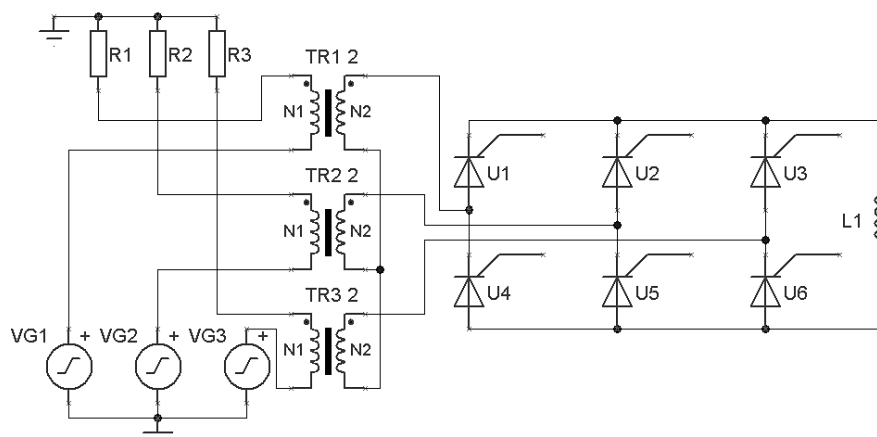
A tirisztorokból azonban egy komplett hidat is fel lehet építeni:



22. ábra

Ebben minden eddig felvázolt lehetőséget megkapunk, és a funkciók még egy extrával bővülnek. A tirisztorok (vagy más vezérelhető teljesítményelektronikai eszköz) begyújtásának idejét képesek vagyunk késleltetni. Az ehhez hasonló megoldást szaknyelven fázishasításos szabályzónak hívjuk, és egy régi megoldás egyszerű teljesítményszabályozáshoz. A működés lényege, hogy ha egy tirisztort veszünk, és rajta egy szinuszfélperiódust vizsgálunk, akkor a szabályozható szögtartomány 0-180 fokig terjed. 0 fok esetén a tirisztor csak diódaaként viselkedik, 180 fokos gyújtásnál pedig szakadásként. A közöttük lévő részen pedig a szög szinuszosan változik a tirisztor által átengedett energia. Tehát ez a vezérlés egy nemlineáris megoldás, de lehet linearizálni is, amennyiben szükséges. A hídnak a nagy előnye, hogy így képes arra, hogy a terhelésre fokozatosan adja rá a teljesítményt, azaz elérhető vele a finomindítás funkció, és a késleltetett kikapcsolás is, hiszen úgy is kikapcsolhatunk, hogy a tirisztorokat egyre nagyobb szögben gyújtjuk. Sőt, ha arra gondolunk, hogy áramgenerátorunk van, és tárolt energiánk, akkor akár az is megoldható, hogy a hálózati feszültségnövekedés, vagy feszültségcsökkenést (ami rövid idejű) ellensúlyozzuk. Ha pl. a hálózati feszültség csökken, a tirisztorok vezérlését úgy módosítjuk, hogy a tekercsáram a terhelésen folyjon keresztül, ezáltal a feszültség helyreáll a terhelésen, miközben a hálózati feszültség ingadozik. Ha a tekercs energiája nem csökken le drasztikusan, akkor a terhelésen sem látható a feszültségváltozás.

Eddig csak 1 fázisú megoldásról volt szó, 3 fázis esetén vagy 3 darab egy fázisú megoldást teszünk be, vagy megépítjük ezt:



23. ábra

3 fázis esetén 3 transzformátoron keresztül, a szekunder oldalra iktattuk be a korlátozót. Itt persze hiába a tirisztorok, megszakítást csak a primerkörben lehet elérni, de a lágyindítás továbbra is egy elérhető funkció marad. A transzformátorok kevés menetszámú tekercsből állnak, a maggal szoros csatolásban, minél kisebb szórt fluxussal. Normál esetben a tekercs szekunder oldali terhelése magas. Amennyiben a primerkörben nagy áramugrás következne be, a korlátozó működésbe lép, és lecsökkenti a terhelését, ezáltal a primer oldali impedancia megnövekszik, és egy nagy soros áramkorlátozó tag lesz mind a három fázisban. Ennek az elrendezésnek még egy előnye, hogy nem csak KIF-en, hanem KÖF-ön is használható. A feszültség azért probléma, mert a legnagyobb tirisztorok is csak pár kV-osak, így már a 10kV is igen komoly gondot okozna ebből a szempontból.

A jövőben főként az utóbbi megoldásokra fogunk koncentrálni, de egyelőre csak KIF-en, és egy fázisra. Várhatóan 100-200A névleges áramú modell fog készülni elsőre, de a későbbiekben akár kA nagyságrendű is, ennek a vizsgálatához a Mátrai Erőmű telepén rendelkezésünkre áll egy 1MVA-es teszthely.

Irodalom:

[1] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Szupravezet%C3%A9s> [2012.11.09]

[2] "Ограничение токов короткого замыкания с тиристорно-реакторными урoйствами " [1975] . ЛПИ Дипломая работа. Morva György