

Pécsi Tudományegyetem
Műszaki és Informatikai Kar
Villamos Hálózatok Tanszék

Alállomási nagytranszformátorok modern diagnosztikája

**Nagy-, és közép feszültségű alállomások főtranszformátor tekercselésének geometriai
elváltozás megbontás nélküli monitorozása a tekercsrendszerek impedancia-frekvencia
karakterisztikáinak felvételével**

Készítette: Károly Levente

Évfolyam: 2019

Belső konzulens: Dr. Kvasznicza Zoltán

Beosztása: Mb. Tanszékvezető Egyetemi Docens

Külső konzulens: Kovács János

Beosztása: E.ON Dél-dunántúli Áramhálózati Zrt.
Alállomási Osztály Primer
berendezések és vállalkozás
szakterületvezető

Pécs
2022

Tartalomjegyzék

1	Bevezető.....	3
1.1	Üzemi mérések, állapotellenőrző vizsgálatok.....	3
2	Nagy-, és közép feszültségű energiaátviteli transzformátorok aktív részének geometriai elváltozásainak érzékelésére alkalmas tekercs impedancia-frekvencia karakterisztikájának felvétele.....	5
2.1	Transzformátorok aktív részének mechanikai igénybevétele	5
2.2	A tekercselés és a vasmag mechanikai állapotának vizsgálatai	7
2.3	A tekercsek mechanikai állapotának meghatározása impedancia-frekvencia jelleggörbékkel	7
2.3.1	Transzformátorok tekercseléseinek frekvenciafüggő impedanciájának felépítése és összetétele	8
2.3.2	Impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálatára alkalmazott kapcsolás és műszerek	19
2.3.3	Transzformátor aktív rész tekercselésének impedancia-frekvencia jelleggörbéinek felvétele.....	26
2.3.4	Vizsgálat kiértékelése.....	32
2.3.5	Fejlesztési irányok, lehetőségek.....	57
3	Összefoglalás	58
	Köszönet nyilvánítás	58
	Irodalomjegyzék.....	59
	Ábrajegyzék.....	59

1 Bevezető

A villamosenergia napjainkban életünk egyik legmeghatározóbb energiaforrása. A mindennapjainkban használatos eszközök többsége villamosenergia felhasználásával szolgálja ki igényeinket. Példaként említve a legelterjedtebb a villamosenergia felhasználásával működő világítás. Minden háztartásban létfontosságú eszköz a lámpa, ami fényt visz az éjszakába.

A villamosenergia-rendszer elengedhetetlen tényező a villamosenergia eljuttatására a villamosenergia termelőitől a fogyasztókig. A villamosenergia-rendszer villamos hálózatokból áll. A villamos hálózatok tulajdonosa, karbantartója, és fejlesztője az elosztóhálózati engedélyes vállalat, másnéven a villamosenergia szolgáltató. Az elosztóhálózati engedélyes feladata a megfelelő minőségű zavartalan villamosenergia szolgáltatás a villamosenergia fogyasztói részére. A villamosenergia nem tárolható, a szállítását nagy távolságokban különböző feszültségű hálózatokon valósítják meg.

A különböző feszültségű hálózatok közötti energiaátalakítás nélkülözhetetlen eszközei a transzformátor gépek, a villamosenergia-rendszer szerves részét képezik. Ezen eszközök feladata a villamosenergia átalakítása különböző feszültségű hálózatokra. A különböző feszültségű transzformátorok feladatukat az ezen eszközök számára létrehozott transzformátor alállomásokban látják el. A transzformátorokat fontosságukból adódóan számos vizsgálatnak vetik alá üzembe helyezés előtt és üzem közben a megfelelő működés és a zavartalan villamosenergia szolgáltatás érdekében.

Dolgozatomban az elosztóhálózati engedélyes tulajdonában álló transzformátorok tekercselésének geometriai elváltozásának megbontás nélküli monitorozásával foglalkozom, ami azt jelenti, hogy a villamos gép szétszerelése nélkül állapítjuk meg villamos mérési módszerekkel, hogy az előző vizsgálat óta a gép tekercsei milyen fizikai helyzetváltozáson mentek keresztül és ebből következtetünk a gép meghibásodására vagy a lehetséges későbbi meghibásodására.

A téma bevezetéseként ismertetem felsorolás szinten a nagy-, és közép-feszültségű transzformátorokra vonatkozó állapotellenőrző vizsgálatokat felsorolás szinten.

1.1 Üzemi mérések, állapotellenőrző vizsgálatok

Ezen vizsgálatok, mérések szükségesek a transzformátor zavartalan, hibátlan működésének biztosításához, mivel a gép, üzem közben különböző termikus, villamos, és mechanikai hatásnak van kitéve. Továbbá az üzemben lévő gépek használat közbeni romlása és az öregedése – elavulás, nem használatból eredendő állapotromlás – is meghibásodáshoz vezet. [1]

Vizsgáljuk a gép szigetelő olajának villamos paramétereit, és kémiai összetételét; külön a teljes transzformátor villamos szigetelő képességét különböző módszerekkel; a zajszintjét; a termikus állapotát; és a mechanikai állapotát. Ezek a vizsgálatok alkalmasak a transzformátor hibáinak előjelzésére, kimutatására, és a transzformátor műszaki állapotának felmérésére. [1]

Mivel a meghibásodások más, és más jellemzőket érintenek, és még nem alkottak meg olyan diagnosztikai módszert, ami az összes jellemzőt egyszerre tudja vizsgálni, ezért az egyes jellemzőket más-más méréssel vizsgáljuk. Fontos megjegyezni, hogy egy-egy vizsgálatból nem tudjuk megállapítani egy transzformátor állapotát, hanem az alábbiakban ismertetésre kerülő vizsgálatok komplex kiértékelésével fogunk átfogó képet kapni a gép állapotáról. [1]

- Szigetelőolajok vizsgálata
 - Általános olajvizsgálat
 - Szigetelőolajban oldott gázok vizsgálata (HGA – hibagáz analízis)
 - Különleges olajvizsgálatok

- A gázrelében összegyűlt gázok vizsgálata
- A szigetelések villamos vizsgálata
 - A szigetelési ellenállás és az abszorpciós tényező mérése
 - A visszatérő feszültség időállandó-függésének mérése
 - A kapacitás és a dielektromos veszteségi tényező ($\tan \delta$) mérése
 - A részleges kisülések mérése
- Zajszintmérés
- Termovíziós vizsgálat
- Tekercsek egyenáramú ellenállásmérése
- Fokozatkapcsoló vizsgálata
- A tekercselés és a vasmag mechanikai állapotának vizsgálata
 - Rezgésmérés
 - A tekercsek mechanikai állapotának meghatározása impedancia-frekvencia jelleggörbékkel

2 Nagy-, és közép feszültségű energiaátviteli transzformátorok aktív részének geometriai elváltozásainak érzékelésére alkalmas tekercs impedancia-frekvencia karakterisztikájának felvétele

Dolgozatom fő témáját fejtem ki ezen fejezetben. Bevezetőként ismertetem a transzformátorok mechanikai igénybevételét, hogy melyek azok a fizikai hatások, amelyek mechanikailag károsíthatják a gépet, illetve ezen elváltozások fajtáit. Mechanikai állapotfelmérésre szolgáló transzformátor diagnosztikai módszer a rezgésmérés is, így ez ebben a fejezetben kerül kifejtésre.

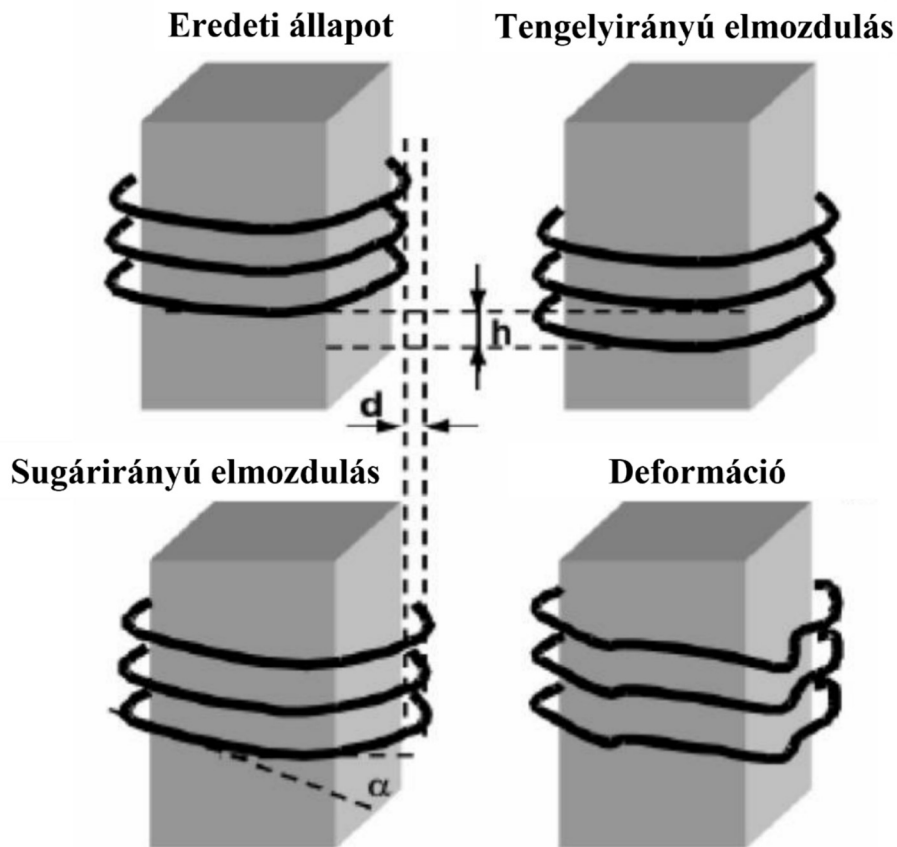
Az impedancia-frekvencia jelleggörbe felvétele, illetve vizsgálatának célszerűsége a transzformátor elemeinek frekvenciafüggő jellege miatt van, ezért bemutatom a transzformátorban megtalálható alapáramköri elemek frekvenciafüggését, illetve a frekvenciafüggés vizsgálatának jelentőségét.

Bemutatom a transzformátorokon végzett impedancia-frekvencia jelleggörbe felvételére alkalmas műszert részletesen, Továbbá bemutatom a transzformátor impedancia-frekvencia jelleggörbéjének jellemzőit, illetve a gép mechanikai torzulásának hatását a görbére.

Végezetül pedig két példán szemléltetem az impedancia-frekvencia jelleggörbe felvételét és a vizsgákat kiértékelését.

2.1 Transzformátorok aktív részének mechanikai igénybevétele

A transzformátor nem villamos forgógép, de a tekercselése és a vasmagja mechanikailag is terhelve van, nem csak villamosan. A tekercselésben sugár-, és tengelyirányú mechanikai mágneses eredetű erőhatások lépnek fel, bekapcsolások és zárlatok során ezen erők a normál üzem során kialakuló erőhatásokat jelentősen meghaladják. A tengelyirányú erőhatások összehúzzák a tekercseket, csökkentik a magasságát. A sugárirányú erőhatások pedig a belső tekercseket összehúzzák, összeroppantják, a külső tekercseket pedig széthúzzák. A tengelyirányú aszimmetria miatt a tengelyirányú erőhatás aszimmetrikus lesz, emellett többlet sugárirányú erőhatás is fellép. Továbbá, ha a tekercsek rögzítése nem megfelelő, akkor bekapcsolások és zárlatok következtében a megnövekedett mechanikai erőhatások során a tekercselés rögzítései fellazulnak, ennek következtében a mechanikai igénybevétel káros hatásai jelentősen deformálják a tekercselést. Mechanikai deformációt okozhatnak a zárlati áramok mellett fokozatkapcsoló hibái és a szállítás során bekövetkező sérülések is. A *2.3.1-1 ábra* a tekercselés különböző mechanikai elváltozásait mutatja. [2]



2.3.1-1. ábra Transzformátor tekercselésének mechanikai elváltozásának szemléltetése [2]

Ezen probléma orvoslására a tekercseket olyan erővel kell leszorítani, amely feszesen tartja a tekercselést bekapcsolási és zárlati erőhatások esetén is, ezt egy a felső járomgerendákra szerelt csavaros vagy rugós leszorítóval oldották meg. Az új gyártástechnológia szerint a tekercseket előre préselik és a felső járomhoz támasztják ki rugós tag alkalmazása nélkül. A mechanikai igénybevétel káros hatásait növelő tényezőkhez tartozik még az olaj-papír szigetelés azon tulajdonsága, hogy a magas hőmérséklet és az öregedés hatására zsugorodik, ennek következtében a tekercselés tengelyirányú mérete csökken. A tekercselésre ható erőhatások következtében történt deformálódásra a 2.3.1-2. ábrán látható kép mutat példát. [2]



2.3.1-2. ábra Mágneses erőhatások következtében deformálódott tekercs [3]

A transzformátor vasmagjára ható mechanikai igénybevételek a magnetostrikciós jelenségből eredeztethetők. A magnetostrikciós jelenség következtében a váltakozó mágneses térbe helyezett ferromágneses anyag alakja és méretei megváltoznak, mivel a váltakozó mágneses tér hatására az adott ferromágneses anyag minden doménje – elemi mágnes – a váltakozó mágneses fluxus irányával megegyezően és frekvenciájának kétszeresével rezeg. Mivel a vasmag több lemezből épül fel ezért a mágneses erőhatás ott a legnagyobb, ahol a mágneses fluxus átlép egy másik lemezbe. Ezen mágneses erők iránya váltakozó, frekvenciája a fluxus frekvenciájának kétszerese, ebből következik, hogy ezek az erők rázzák a vasmag lemezeit. A tekercsekben átfolyó üzemi áramok esetén fellépő erőhatások töredékei a vasmagra ható erőhatásoknak. [2]

2.2 A tekercselés és a vasmag mechanikai állapotának vizsgálatai

A vizsgálatok célja a transzformátorok mechanikai elváltozásának megállapítása. Transzformátorokban bekapcsolások, továbbá zárlatok vagy más villamos túligénybevételek hatására keletkező mágneses erőhatások roncsolják az aktív részt. A tekercsek leszorítása és a vasmagot összetartó elemek fellazulnak, továbbá a szigetelő elemek és a tekercselés ezen mozgások hatására deformálódnak. [1]

A transzformátorok mechanikai állapotának kimutatására a rezgésmérés és a tekercsek impedancia-frekvencia jelleggörbéinek felvétele szolgál. Ezen vizsgálatok a transzformátor szétszerelése nélkül képesek információt szolgáltatni a gép mechanikai állapotáról. Hibák esetén a gépet javítóműhelybe vagy a gyárba kell szállítani javításra. [1]

2.3 A tekercsek mechanikai állapotának meghatározása impedancia-frekvencia jelleggörbékkel

A vizsgálat célja, hogy a transzformátorok aktív rész tekercselésének mechanikai elváltozását megbontás nélkül villamos mérések alapján monitorozzuk. A vizsgálatra az IEC 600076-18:2012 és az IEEE Std C57.149-2012 szabvány vonatkozik. A vizsgáló műszer

frekvencia változtatásával előre meghatározott állandó mérőfeszültséggel vizsgálja adott frekvenciaértékeknél a műszerre kapcsolt tekercsen folyó áramot. A műszer részletes leírása a 4.3.2 alfejezetben található. A transzformátorok aktív rész tekercselésének impedanciája erősen frekvenciafüggő, geometriai elváltozások hatására az impedanciát alkotó frekvenciafüggő elemek vágási frekvenciaértéke változik, ebből következik, hogy a vizsgálat alkalmas geometriai elváltozások kimutatására. [1]

2.3.1 Transzformátorok tekercseléseinek frekvenciafüggő impedanciájának felépítése és összetétele

Az induktivitások (tekercsek) és a kapacitások (kondenzátorok) frekvenciafüggő ellenállással rendelkező elemek, ezeket energiatárolós elemeknek is nevezik, azon tulajdonságuk következtében, hogy a villamos energiát valamilyen formában képesek tárolni rövidebb-hosszabb időre. A transzformátor tekercselésének induktivitása van. A tekercsek menetei között, és a különböző feszültség-szintű tekercselések között kapacitív csatolás van. Továbbá a tekercsek rendelkeznek ohmos ellenállással is. Ezen három összetevő alkotja a transzformátor tekercselésének frekvenciafüggő impedanciáját.

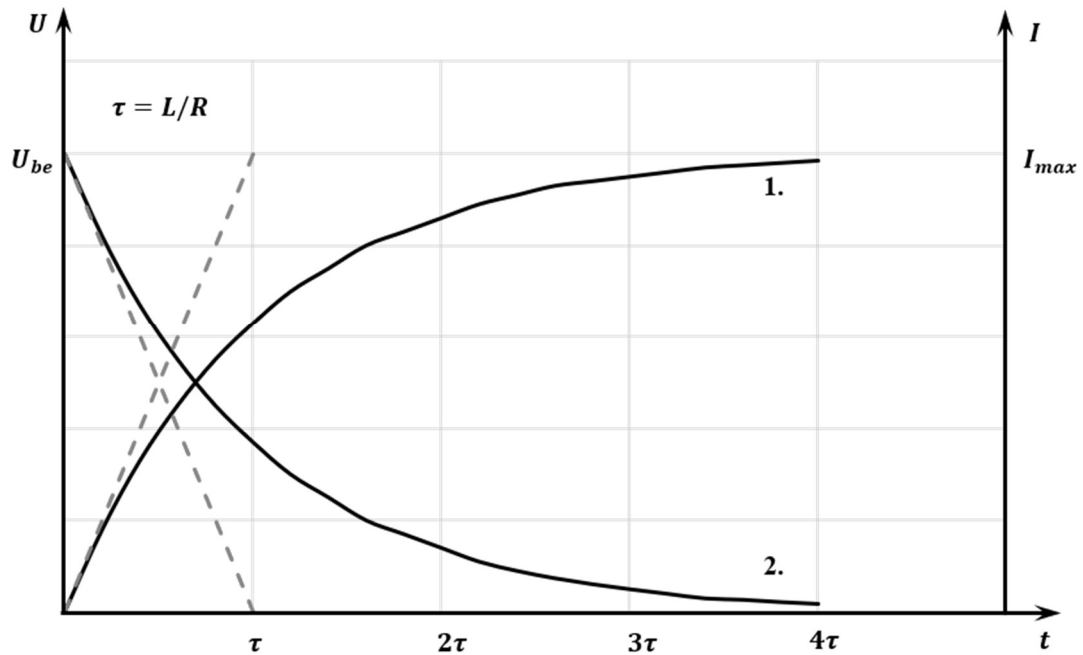
2.3.1.1 Induktivitások frekvenciafüggése

Induktivitásokra kapcsolt egyenfeszültség hatására az induktivitáson folyó áram mágneses teret gerjeszt. A ferromágneses vasmaggal ellátott induktivitásban a ferromágneses test doménjei a mágneses tér irányába állnak be, felmágneseződik. A vasmaggal rendelkező induktivitásokban a ferromágneses test hiszterézis görbével rendelkezik, ami azt jelenti, hogy nem ugyanaz az indukció-térerősség $[B(H)]$ görbe tartozik a felmágnesezéshez és a lemágnesezéshez, erre az egyszerű és logikus magyarázat az, hogy a mágneses tér megszűnésével felmágneseződött ferromágneses test doménjei nem állnak vissza az eredeti állapotukba.

A tekercs induktivitása (L) egyenesen arányos a menetszámok négyzetével (N^2), a tekercs keresztmetszetével (A), a vákuum permeabilitásával (μ_0), és a vastest relatív permeabilitásával (μ_r), továbbá fordítottan arányos a tekercs hosszával (l). [4]

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r A N^2}{l} \left[\frac{Vs}{A} \right] [H] \quad (2)$$

A bekapcsolás pillanatában a tekercs szakadásként viselkedik – tehát ellenállása végtelen nagy – mindaddig, amíg a mágneses tér fel nem épül, ezt követően rövidzárként viselkedik – tehát ellenállása nullára csökken –. A feszültség-idő, és áram-idő függvénye az 2.3.1-1. ábrán látható egyenfeszültség rákapcsolása esetén, 1. számmal jelölt görbe az áram, 2. számmal jelölt görbe a feszültség bekapcsolás utáni tranziens jelenségeit szemlélteti. A görbék közül egyértelműen látszik, hogy az áram a feszültséghez képest később jelenik meg, ez a jelenség annak tudható be, hogy a mágneses térnek fel kell épülnie, a mágneses teret pedig a tekercsek meneteiben folyó áram gerjeszti. A mágneses tér felépüléséhez szükséges idő egyenesen arányos a tekercs induktivitásával, és fordítottan arányos a tekercset tápláló áramkör ellenállásával. Ezen jelenség jelentősége váltakozó feszültségű táplálás esetén lesz jelentős.

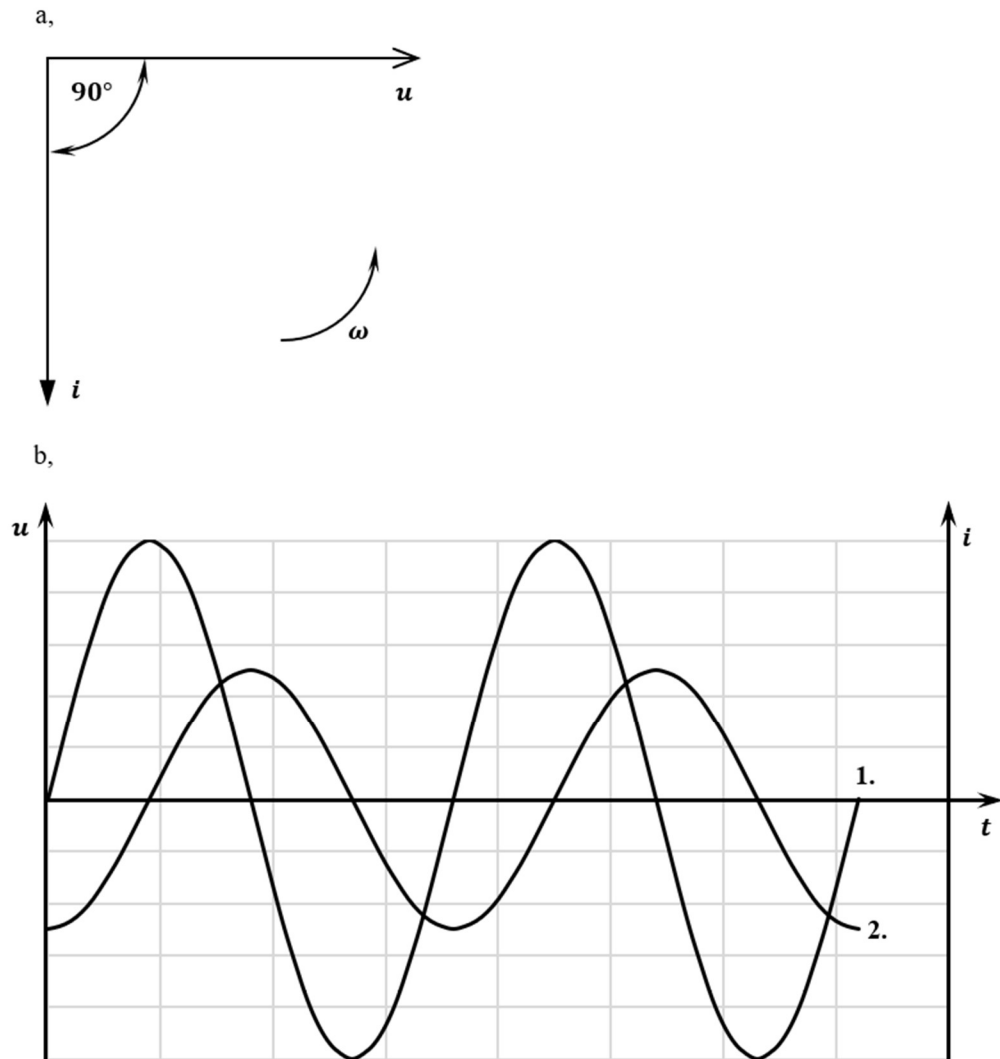


2.3.1-1. ábra Induktivitásra kapcsolt egyenfeszültség hatására az induktivitáson kialakuló feszültség és áram tranziens időfüggvénye

Az induktivitásban a tápláló egyenfeszültség megszűnése hatására feszültség indukálódik, amely egyenesen arányos a tekercs menetszámával és a fluxus változásának sebességével, ebből levezethető, hogy az adott tekercs induktivitásával és a rajta átfolyó áram változásának sebességével is egyenesen arányos az indukált feszültség értéke.

$$U_i = N \frac{d\phi}{dt} = L \frac{di}{dt} \text{ [V]} \quad (3)$$

Váltakozó feszültségű táplálás hatására az induktivitásban a tápláló feszültség frekvenciájával azonos frekvenciával és azonos jelformával változik a fluxus is, de egy negyed periódussal lemaradva a feszültségtől, mivel a fluxust az áram gerjeszti, az áram pedig a fentebb említett összefüggések miatt késik 90° -ot a feszültséghez képest. Az 2.3.1-2. a, ábrán látható az induktivitáson folyó áram, és feszültség fázor ábrája. Az 2.3.1-2. b, ábrán látható az induktivitáson eső feszültség és a rajta átfolyó szinuszosan váltakozó hullámformájú időfüggvénye, 1. számú görbe a feszültséget, 2. számú görbe pedig az áramot jelöli.



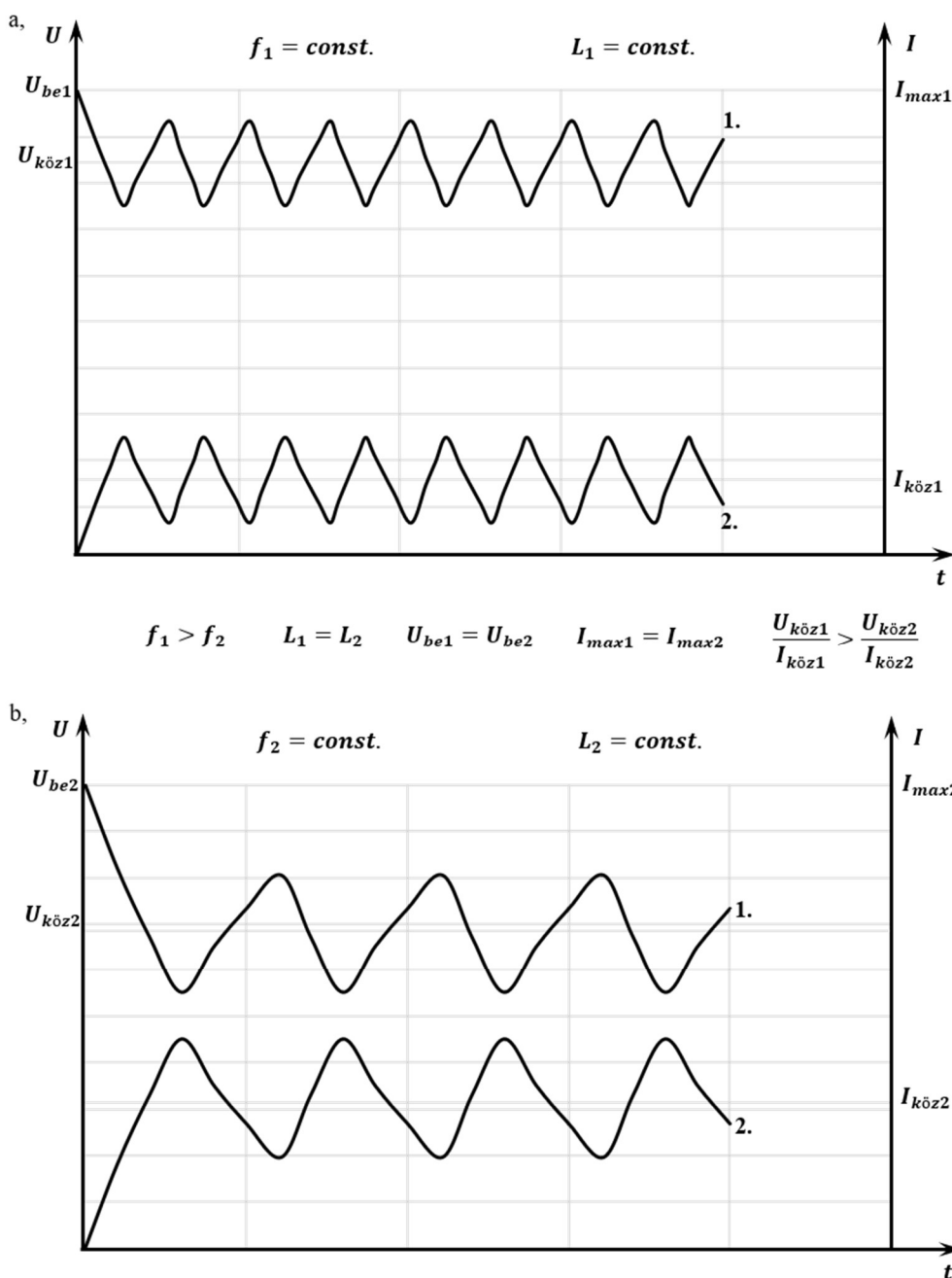
2.3.1-2. ábra Induktivitáson eső feszültség, és a rajta átfolyó áram fázor ábrája, és időfüggvénye váltakozó feszültségű táplálás esetén

Az induktivitás váltakozó feszültségű áramkörbe kapcsolva induktív reaktanciával – látszólagos ellenállással – rendelkezik. Az induktív reaktancia egyenesen arányos a tápláló váltakozó feszültség körfrekvenciájával, és a tekercs induktivitásának értékével, továbbá a rajta eső komplex feszültség vektor és a rajta folyó komplex áram vektor hányadosával, jele X_L . Értéke a következő összefüggésekkel számítható,

$$X_L = j \cdot \omega \cdot L = \frac{\bar{U}}{\bar{I}} [\Omega] \quad (4)$$

ahol ω a tápláló feszültség körfrekvenciája, L pedig a tekercs induktivitása. Az induktív reaktancia egy ellenállás dimenziójú, $[\Omega]$ (ohm) mértékegységű komplex jellemző. Frekvenciafüggése abból is eredeztethető, hogy nagy frekvencia esetén a mágneses térnek nincs ideje felépülni, tehát a feszültség és az áramerősség középérték hányadosának – az látszólagos ellenállás, reaktancia – értéke nagy lesz, amit a 2.3.1-2. a, ábra mutat. Kisebb frekvencia esetén a feszültség és az áramerősség középértékének hányadosa kisebb érték, mert a mágneses térnek több ideje van felépülni, ez a 2.3.1-2. b, ábrán látható. Egy váltakozó feszültségű forrásra kapcsolt induktivitás áram-idő és feszültség-időfüggvénye a 2.3.1-3. a, ábra és a 2.3.1-3. b,

ábra összehasonlításával szemléltethető az induktív reaktanciák frekvenciafüggése, ezen ábrák esetén az 1. számú görbe a feszültséget, és a 2. számú görbe pedig az áramerősséget jelöli.



2.3.1-3. ábra Induktivitásra kapcsolt váltakozó feszültség hatására az induktivitáson kialakuló áram-idő és feszültség-idő függvény két különböző frekvenciaértékre ábrázolva

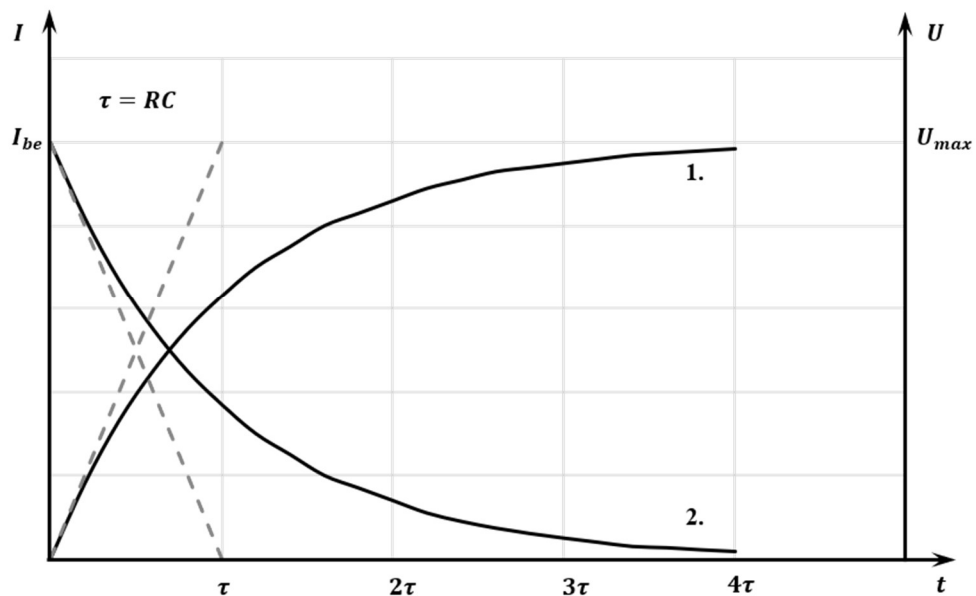
2.3.1.2 Kapacitások frekvenciafüggése

A kapacitásokra kapcsolt egyenfeszültség hatására a kondenzátor fegyverzetei között lévő szigetelés polarizálódik, töltés halmozódik fel.

A kondenzátor kapacitása egyenesen arányos a vákuum permittivitásával – dielektormos állandójával – (ϵ_0), a kondenzátor fegyverzetei közt megtalálható szigetelő test relatív permittivitásával (ϵ_r), és a fegyverzetek felületével (A), továbbá fordítottan arányos a fegyverzetek távolságával (d). [5]

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} \left[\frac{\text{As}}{\text{V}} \right] [\text{F}] \quad (5)$$

A bekapcsolás pillanatában a kapacitás fegyverzetein lévő kiegyenlített töltések áramlásnak indulnak a negatívabb elektródáról a pozitívabb felé, továbbá a fegyverzetek között megtalálható szigetelő anyag polarizálódni kezd, tehát a kondenzátor feltöltődik. Ebből következik, hogy egyenfeszültségű táplálás bekapcsolásának pillanatában a kondenzátor rövidzárként viselkedik – ellenállása közelíti a nulla értéket –, a kondenzátor feltöltődése után a kondenzátor szakadásként viselkedik – ellenállása nagy értéket vesz fel –. A feszültség-idő, és áram-idő függvénye az 2.3.1-4. ábrán látható egyenfeszültség rákapcsolása esetén, 1. számmal jelölt görbe a feszültség, 2. számmal jelölt görbe az áram bekapcsolás utáni tranziens jelenségeit szemlélteti. A görbékből következtethető, hogy a kondenzátoron az áram a feszültséghez képest sietve jelenik meg, mert a kondenzátorban megmaradt töltések a villamos tér hatására kiegyenlítő áramlásnak indulnak, továbbá a kondenzátor feltöltődéséhez időre van szükség. Ezen idő a kondenzátort töltő áramkör ellenállásával és a kondenzátor kapacitásával egyenesen arányos. Ez a jelenség az induktivitás jelenségeihez hasonlóan a váltakozó feszültségű táplálás esetén lesz nagyobb jelentőségű.



2.3.1-4. ábra Kapacitásra kapcsolt egyenfeszültség hatására a kapacitáson kialakuló feszültség és áram tranziens időfüggvénye

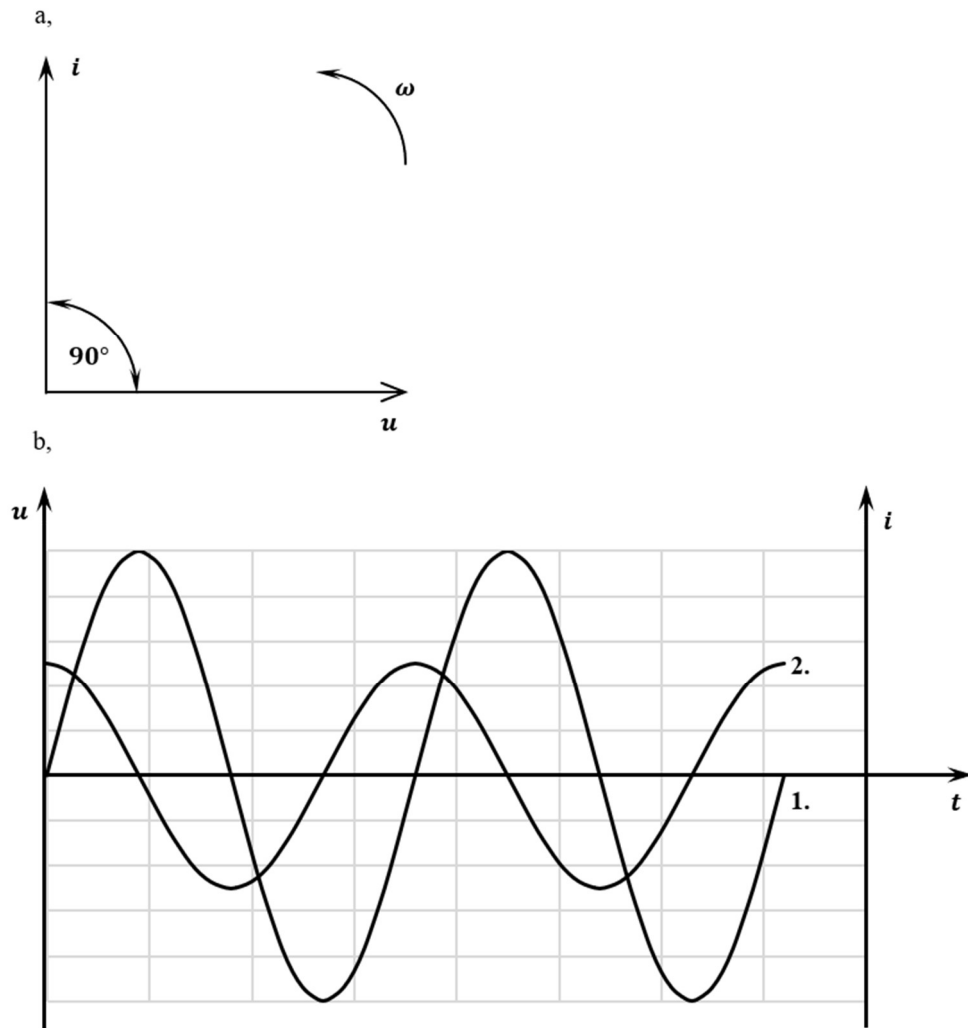
A tápláló egyenfeszültség megszűnése után a kondenzátorban a kondenzátor kapcsain mérhető feszültséggel (U_C) és a kondenzátor kapacitásával (C) egyenesen arányos mennyiségű töltés marad a kondenzátor fegyverzetein. Ezen töltések a kondenzátorban lévő szigetelőanyag szigetelési ellenállásán keresztül kisülnek 5τ idő alatt, amely arányos a kondenzátor kapacitásával (C) és a szigetelő test szigetelési ellenállásával (R_{sz}).

$$Q = CU_C$$

$$\tau = R_{sz}C$$

Váltakozó feszültségű táplálás esetén a kondenzátor fegyverzetei között a táplálófeszültség frekvenciájával azonos frekvenciával és jelalakkal váltakozó villamos tér jön létre. A váltakozó villamos tér kialakításához a kondenzátort ki kell sütni és fel kell tölteni ellentétes polaritásával. Ebből következik, hogy a kondenzátor fegyverzetein mért feszültséghez képest a kondenzátoron folyó áram időfüggvénye egy negyed periódussal, 90° -kal siet. Az 2.3.1-5. a,

ábrán látható a kapacitáson folyó áram, és feszültség fázor ábrája. Az 2.3.1-5. b, ábrán látható a kapacitáson eső feszültség és a rajta átfolyó szinuszosan váltakozó hullámformájú időfüggvénye, 1. számú görbe a feszültséget, 2. számú görbe pedig az áramot jelöli.



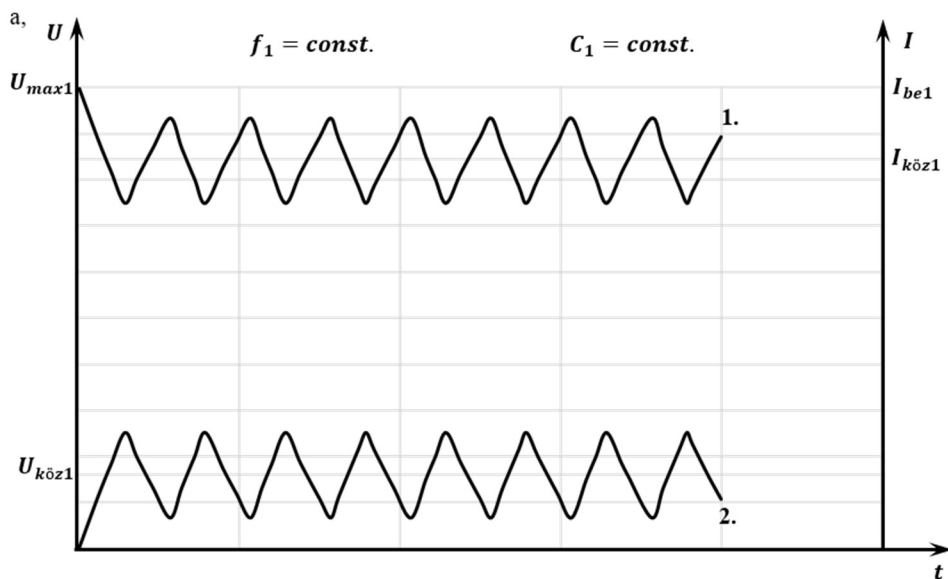
2.3.1-5. ábra Kapacitáson eső feszültség, és a rajta átfolyó áram fázor ábrája, és időfüggvénye váltakozó feszültségű táplálás esetén

A kapacitás váltakozó feszültségű áramkörbe kapcsolva kapacitív reaktanciával jellemezhető. A kapacitív reaktancia a tápláló váltakozó feszültség frekvenciájával és a kondenzátor kapacitás értékével fordítottan arányos komplex mennyiség, továbbá a rajta eső komplex feszültség vektor és a rajta átfolyó komplex áram vektor hányadosa. Jele X_C . Értéke a következő összefüggéssel számítható,

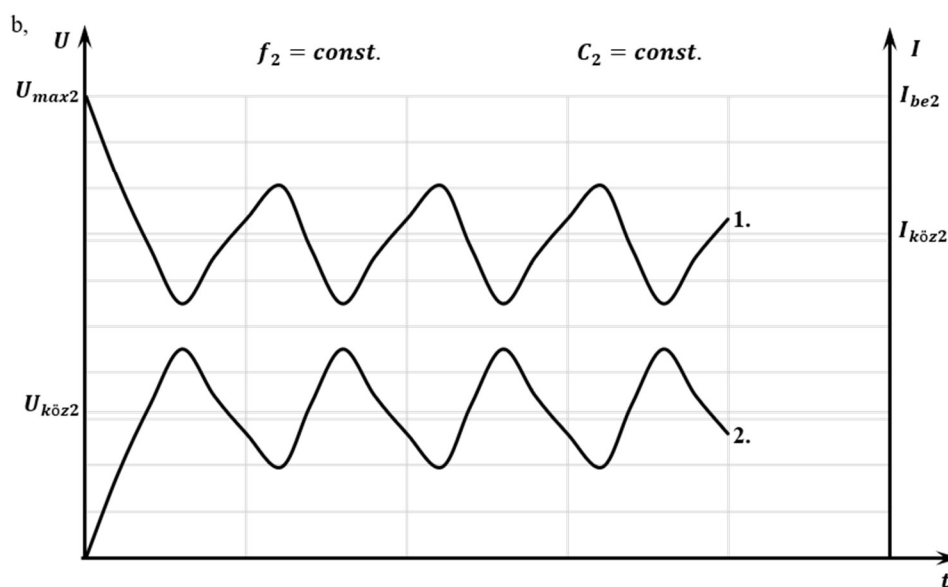
$$X_C = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} = \frac{\bar{U}}{\bar{I}} [\Omega] \quad (6)$$

ahol ω a tápláló feszültség körfrekvenciája, C pedig a kondenzátor kapacitása. A kapacitív reaktancia az induktív reaktanciához hasonlóan ellenállás dimenziójú komplex mennyiség, mértékegysége $[\Omega]$ (ohm). A kapacitív reaktancia is frekvenciafüggő mint az induktív reaktancia mert például nagy frekvencia esetén a kondenzátornak kevesebb ideje van feltöltődni, tehát a villamos térerősség kisebb értéket tud csak felvenni, ennek következtében a kondenzátor két fegyverzete közötti feszültség középértéke kis érték lesz, a rajta átfolyó áram középértéke pedig nagy. Ezért a kapacitív reaktancia értéke nagyobb frekvencia esetén kisebb

értéket vesz fel, ahogy az 2.3.1-6. a, ábrán látható, mint kisebb frekvencia esetén, ami az 2.3.1-6. b, ábrán látható. Egy váltakozó feszültségű forrásra kapcsolt kapacitás áram-idő és feszültség-időfüggvénye a 2.3.1-6. a, ábra és a 2.3.1-6. b, ábra összehasonlításával szemléltethető az kapacitív reaktanciák frekvenciafüggése, ezen ábrák esetén az 1. számú görbe az áramot, és a 2. számú görbe pedig a feszültséget jelöli.



$$f_1 > f_2 \quad C_1 = C_2 \quad U_{max1} = U_{max2} \quad I_{be1} = I_{be2} \quad \frac{U_{köz1}}{I_{köz1}} < \frac{U_{köz2}}{I_{köz2}}$$



2.3.1-6. ábra Kapacitásra kapcsolt váltakozó feszültség hatására az kapacitáson kialakuló áram-idő és feszültség-idő függvény két különböző frekvenciaértékre ábrázolva

2.3.1.3 Ohmos ellenállások frekvenciafüggése

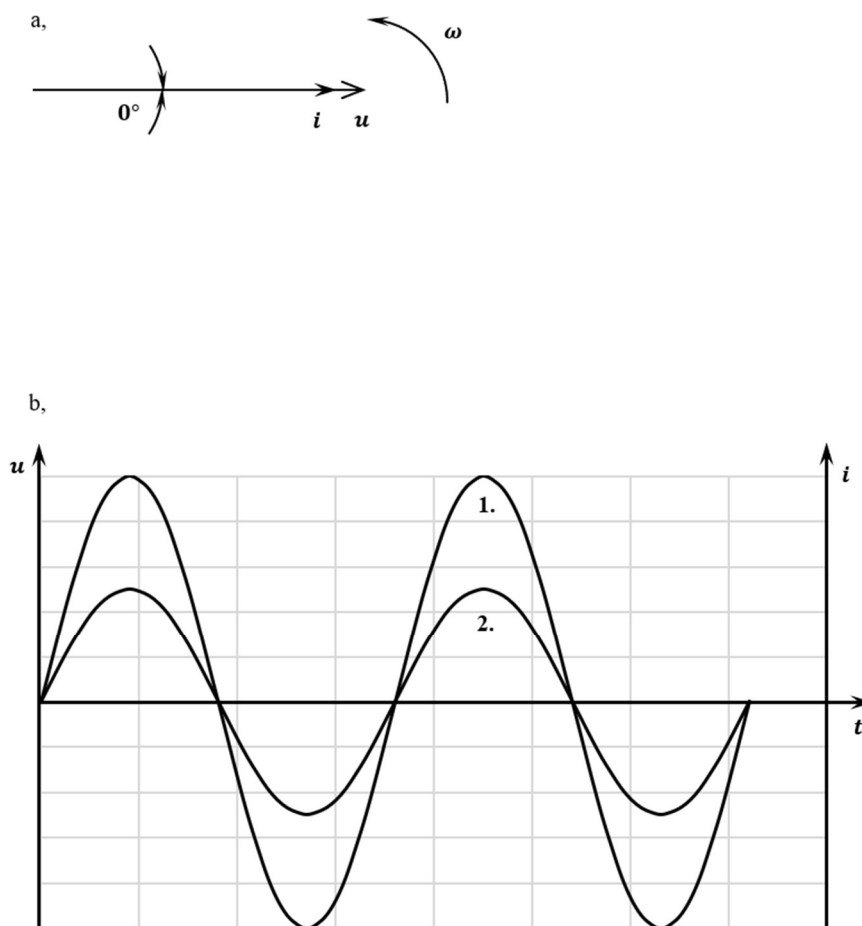
Az ellenállások villamos vezető anyagokból készülnek, továbbá minden villamos vezető anyagnak van ellenállása. Ellenállásnak nevezzük a vezető anyagok azon tulajdonságát, amely a töltéshordozók áramlását korlátozni igyekszik. Egy ellenállás egyenfeszültségű táplálása esetén a feszültséggel és az ellenállással egyenesen arányosan a vezetőben villamos áram fog

folyni. Tehát egy vezető ellenállásának értékét számíthatjuk, Ohm-törvénye értelmében a rajta eső feszültség és a rajta átfolyó áram hányadosából. Jele R , mértékegysége $[\Omega]$ (ohm).

$$R = \frac{U}{I} [\Omega] \quad (7)$$

Egy ellenálláson a bekapcsolás pillanatában az egyenfeszültséggel egy pillanatban megjelenik az áram is. Tehát az induktivitásokkal és a kapacitásokkal ellentétben az egyes mennyiségek azonos fázisban vannak, mivel a töltéshordozók sebessége és iránya tápláló váltakozó feszültség pillanatnyi értéke szerint fog változni. Ez váltakozó feszültségű táplálásra is igaz.

Az 2.3.1-7 a, ábrán látható egy ellenállás váltakozó feszültségű fázor ábrája, az 2.3.1-7 b, ábrán pedig az ellenálláson folyó áram és a rajta eső feszültség időfüggvénye, az ábrákon 1. számmal a feszültség, 2. számmal az áram van jelölve. Ezen ábrákból látható, hogy váltakozó feszültségű táplálás szempontjából az ellenállással folyó áram és a rajta eső feszültség fázisban van. Ebből következik, hogy az ellenállások értéke anyagjellemző, tehát nem függ a frekvenciától.



2.3.1-7. ábra Ellenálláson eső feszültség, és a rajta átfolyó áram fázor ábrája, és időfüggvénye váltakozó feszültségű táplálás esetén

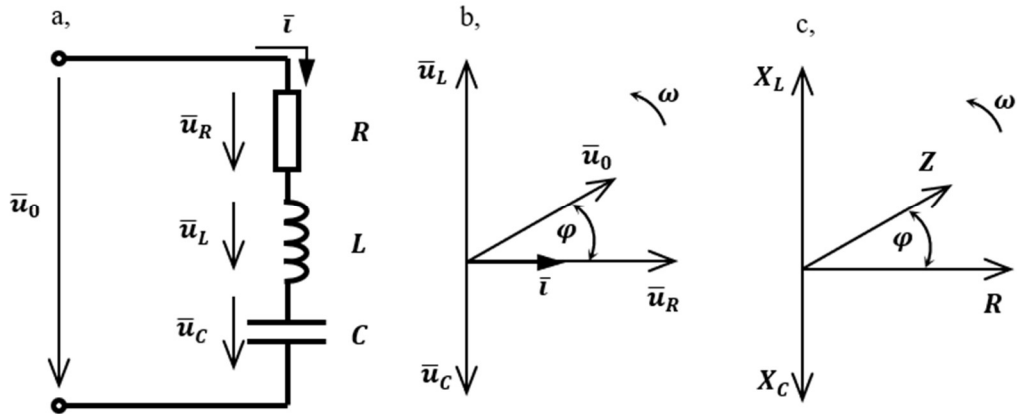
2.3.1.4 RLC kör frekvenciafüggése

Az RLC körök sorosan és/vagy párhuzamosan kapcsolt ellenállásokból, induktivitásokból és kapacitásokból állnak. Transzformátorok aktív rész tekercselésének van induktivitása és ellenállása, továbbá menetei között kapacitások találhatók, ezért felírható egy soros RLC

körként. A soros RLC kör egyes elemei kapacitív és induktív reaktanciájának, illetve ellenállásának komplex eredő értékét – összegét – impedanciának nevezzük, jele Z , mértékegysége $[\Omega]$ (ohm).

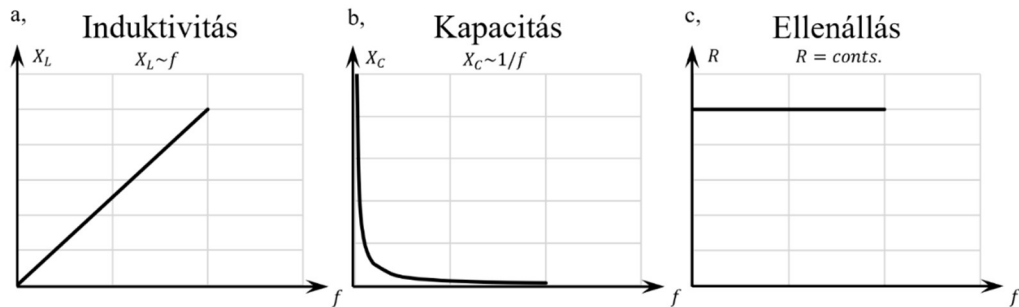
$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + jX_L - jX_C = \frac{\bar{u}_R}{\bar{i}} + \frac{\bar{u}_L}{\bar{i}} + \frac{\bar{u}_C}{\bar{i}} \quad (7)$$

Egy RLC kör kapcsolási rajza a 2.3.1-8. a, ábrán, a feszültség fázor ábrája a 2.3.1-8. b, ábrán, és az impedancia fázor ábrája az 2.3.1-8. c, ábrán látható. φ -vel jelöljük a fázisszöget, amely a valós és a látszólagos, komplex érték között van, értéke szögfüggvényekkel számítható.



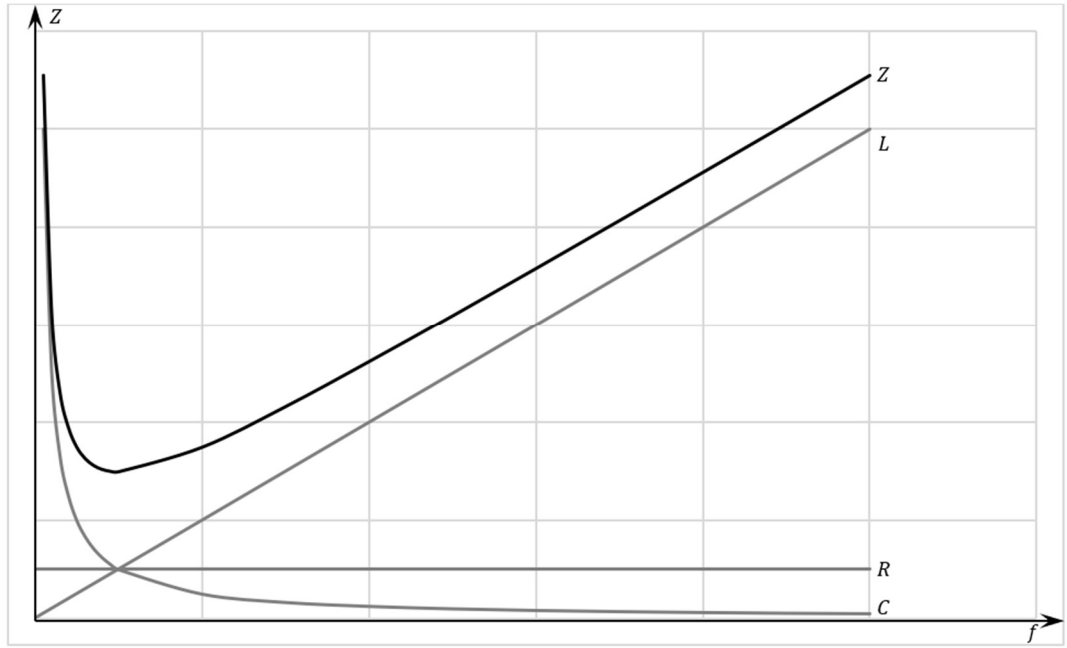
2.3.1-8. ábra Soros kapcsolású RLC kör kapcsolási rajza, feszültség, és impedancia fázor ábrája

A 2.3.1-9 ábra jelleggörbéi mutatják az RLC körök egyes elemeinek frekvenciafüggését külön-külön. Az 2.3.1-9 a, ábrán látható a tekercsek induktív reaktancia-frekvencia jelleggörbéje. Az 2.3.1-9 b, ábrán látható a kondenzátorok kapacitív reaktancia-frekvencia jelleggörbéje. Az 2.3.1-9 c, ábrán látható az ellenállások ellenállás-frekvencia jelleggörbéje, lineáris frekvenciatengelyen ábrázolva.



2.3.1-9. ábra RLC kör egyes elemeinek induktív reaktancia- frekvencia, kapacitív reaktancia-frekvencia, és ellenállás-frekvencia jelleggörbéje

Az soros RLC körök frekvenciafüggése a kör egyes elemeinek kapacitás, induktivitás, és ellenállás értékének függvénye. Egy RLC kör impedanciája frekvenciafüggő mivel az impedanciát alkotó kapacitív és induktív reaktanciák frekvenciafüggők, mivel az impedancia kapacitív és induktív reaktanciák, és ellenállások komplex eredője, ezért az eredő impedancia-frekvencia jelleggörbék is az egyes tagok frekvencia jelleggörbéinek összegeként állítható elő. Egy RLC kör impedancia-frekvencia jelleggörbéje a 2.3.1-10. ábrán látható.



2.3.1-10. ábra RLC kör impedancia-frekvencia jelleggörbéje

Az impedancia frekvenciafüggvényének meghatározásával felrajzolható az RLC kör Bode-diagramja, ami a 2.3.1-11. ábrán látható. Az felül látható az amplitúdó menet, alul pedig a frekvencia menet.

$$Z(j\omega) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = \frac{j\omega RC + (j\omega)^2 LC + 1}{j\omega C} \quad (8)$$

$$Z(j\omega) = \frac{LC \left(j\omega + \frac{RC - \sqrt{RC^2 - 4LC}}{2LC} \right) \left(j\omega + \frac{RC + \sqrt{RC^2 - 4LC}}{2LC} \right)}{j\omega C} \quad (9)$$

$$Z(j\omega) = LC \frac{RC - \sqrt{RC^2 - 4LC}}{2LC} \cdot \frac{RC + \sqrt{RC^2 - 4LC}}{2LC} \cdot \frac{\left(1 + \frac{j\omega}{\frac{RC - \sqrt{RC^2 - 4LC}}{2LC}} \right) \left(1 + \frac{j\omega}{\frac{RC + \sqrt{RC^2 - 4LC}}{2LC}} \right)}{j\omega C} \quad (10)$$

$$Z(j\omega) = (R^2 C - RC + 4L) \cdot \frac{\left(1 + \frac{j\omega}{\frac{RC - \sqrt{RC^2 - 4LC}}{2LC}} \right) \left(1 + \frac{j\omega}{\frac{RC + \sqrt{RC^2 - 4LC}}{2LC}} \right)}{j\omega(4LC)} \quad (11)$$

$$Z(j\omega) = a \cdot \frac{\left(1 + \frac{j\omega}{b} \right) \left(1 + \frac{j\omega}{c} \right)}{\frac{j\omega}{d}} \quad (12)$$

$$a = C(R^2 - R) + 4L \quad (13)$$

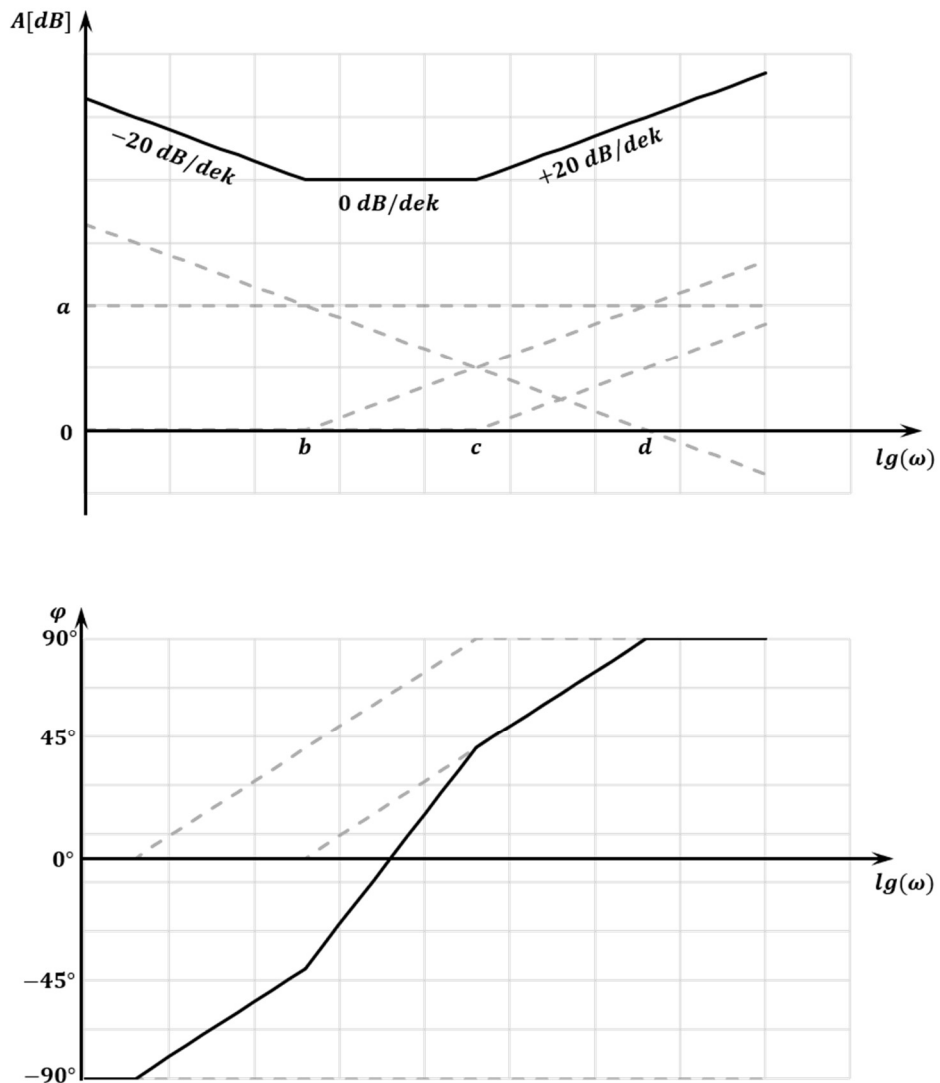
$$(14)$$

$$b = \frac{RC - \sqrt{RC^2 - 4LC}}{2LC}$$

$$c = \frac{RC + \sqrt{RC^2 - 4LC}}{2LC} \quad (15)$$

$$d = \frac{1}{4LC} \quad (16)$$

A Bode-diagram egyes vágási körfrekvenciáit meghatározó – az egyenletben a , b , c , és d betűvel jelölt – együtthatók az RLC körben lévő ellenállás, induktivitás és kapacitás értékek függvényei. A transzformátor aktív rész tekercselésének geometriai deformációja során ezen értékek változnak. A Bode-diagram alakja, amplitúdó-, és fázismenete ezen jellemzőktől függően lehet lengő tag is.



2.3.1-11. ábra RLC kör Bode-diagramja

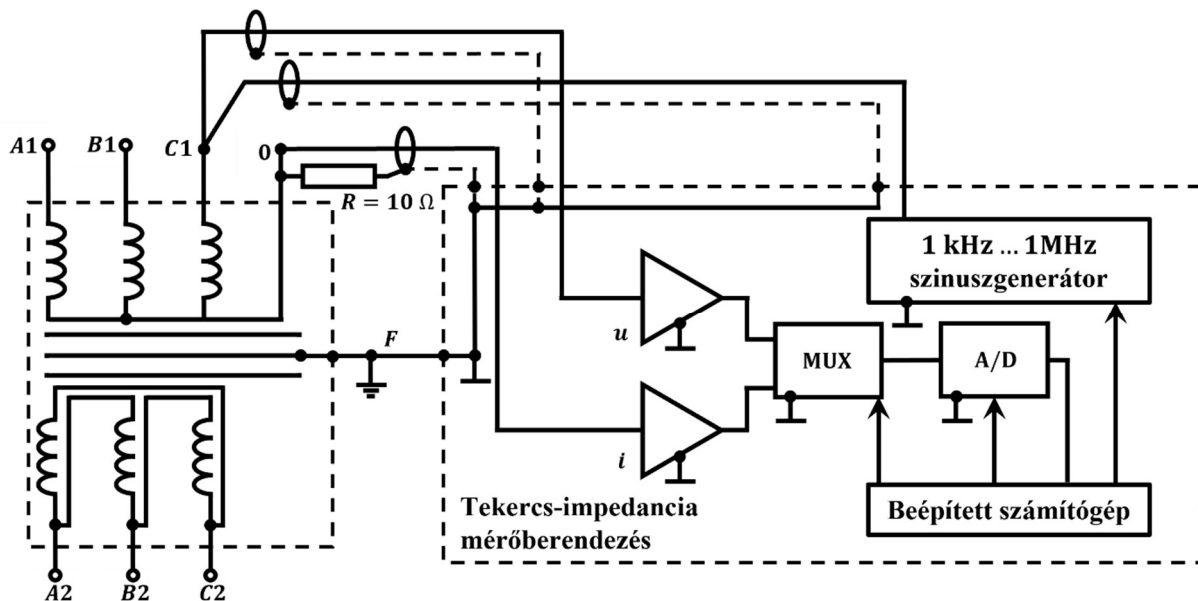
Mivel a RLC körök kapacitív és induktív elemei ellentétes irányban, de azonos irányultsággal tolják el a feszültség fázisát az áramhoz képest, ebből következik, hogy minden RLC körben van egy frekvencia, amelyen a kapacitások és az induktivitások egymás fázistoló hatását kikompenzálják, ezen frekvenciát rezonancia frekvenciának nevezzük, jele: f_0 . Rezonancia esetén az RLC kör impedanciája tisztán ohmos valós érték lesz.

A transzformátorok impedanciája függ az aktív rész tekercselésének kapacitás értékétől, induktivitás értékétől, ellenállásától és a vizsgálat során alkalmazott frekvenciáktól. Transzformátorok mechanikai deformálódásának hatására megváltozik az induktivitása, kapacitása és ellenállása, tehát az impedanciája is. A kapacitás és induktivitás, illetve ellenállás értékének változása befolyásolja az RLC körök impedanciáját, az egyes elemeinek vágási körfrekvenciáját, továbbá a rezonancia körfrekvenciát is. Ezen jellemzők kimutathatóak az impedancia-frekvencia jelleggörbe, illetve a kör Bode-diagramjának felvételével. A Bode-diagram felvétele ezen felül jelentősebben képes kimutatni a vágási körfrekvenciákat, és ezek az eltérést a korábbi vizsgálatok során felvett és az aktuális Bode-diagram összehasonlításával. Ezért az impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálata kiválóan alkalmas a gép mechanikai deformálódásának kimutatására. Továbbá ezen állapotváltozás kimutatására az impedancia-frekvencia jelleggörbe mellett még a Bode-diagram felvétele is alkalmas lehet.

2.3.2 Impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálatára alkalmazott kapcsolás és műszerek

A vizsgálatok elvégzéséhez a transzformátorokat ki kell kapcsolni és feszültség mentesíteni. Továbbá a nagy-, és a középfeszültségű kivezetéseiről a csatlakozó vezetékeket le kell szerelni. [1]

A mérési kapcsolások kialakítása a következő. A feszültségmentesített transzformátor kivezetéséhez egyesével csatlakoztatjuk a műszert, koaxiális árnyékolt vezetékekkel. Minden tekercset a kivezetései segítségével külön-külön mérjük. A mérés elvi kapcsolási vázlata az 2.3.2-1. ábrán látható, az ábrán a C1 tekercs kivezetéséhez csatlakoztatják a mérőműszer mérőfeszültség szolgáltató szinuszgenerátorát, továbbá az adott tekercs kivezetését csatlakoztatják a műszer feszültségmérő kivezetéséhez. Az ábrán látható módon a műszer áramerősségmérő kivezetéséhez csatlakoztatják a tekercs másik végét, ami jelen esetben a csillagpont. A jelleggörbék felvételéhez spektrumanalizátorokat alkalmaznak. A mérőfeszültség néhány volt nagyságrendű és változtatható frekvenciájú. A műszer a tekercsekre kapcsolt feszültség hatására a tekercseken folyó áramot méri, a tekercsekkel sorba kapcsolt ellenállás segítségével. A műszer az áram és a feszültség hányadosából határozza meg az [100 Hz; 1 MHz] intervallumon belül meghatározott frekvenciákhoz tartozó impedanciákat. A mérési értékek összetartozó impedancia-frekvencia értékpárjaiból veszik fel az impedancia frekvencia jelleggörbéket. [1]



2.3.2-1. ábra Impedancia-frekvencia karakterisztika felvételére alkalmas mérő kapcsolás elvi kapcsolási vázlata [1]

Az impedancia-frekvencia jelleggörbék felvételére az E.ON Dél-dunántúli Áramhálózati Zrt. vállalatnál B&C Diagnostics által gyártott nyolc csatornás Traftek 4.2.27 sorszámú műszert alkalmaznak, amelynek fényképe az 2.3.2-2. ábrán látható. [6]



2.3.2-2. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbe felvételére alkalmazott B&C Diagnostics Traftek 4.2.27 műszer [7]

A műszer egységei három fő részre bonthatók, ezek az alapkészülékek, a nyolc darab aktív mérőfej, és a mérő vezetékek. [7]

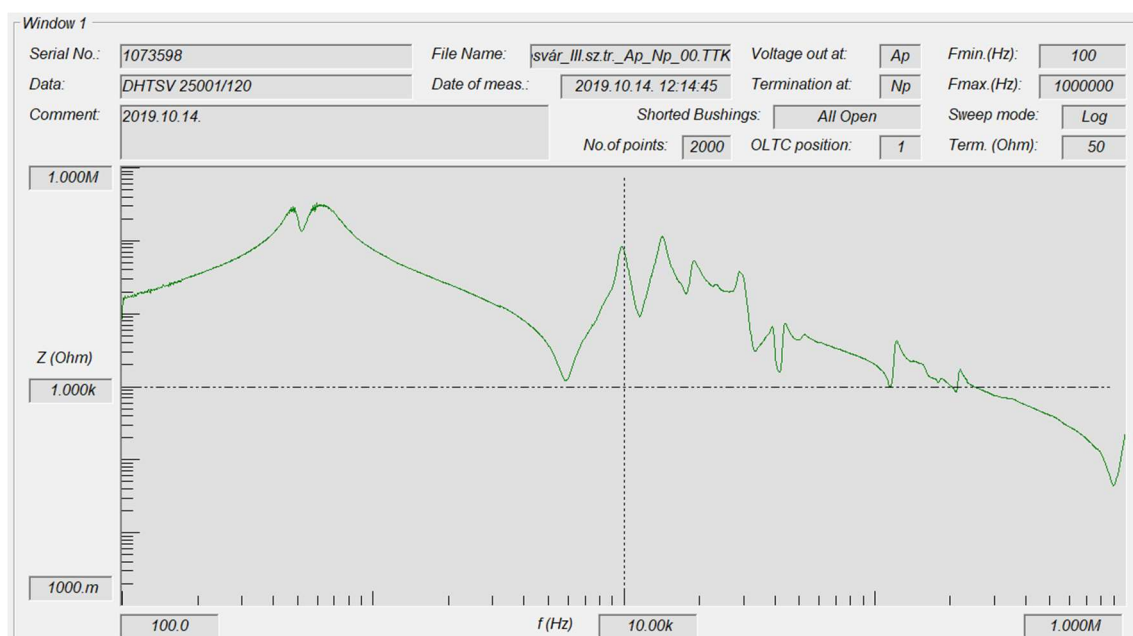
A nyolc darab aktív mérőfej kivezetésén Neutrik NL4MP csatlakozó aljzat található, amelyek a mérő jelek ki és bevezetésére szolgálnak a műszerbe. Az aktív mérőfejeket 15 m hosszú Ethernet kábellel csatlakoztatjuk a műszerhez, az aktív mérőmodulokat pedig mérővezetékekkel csatlakoztatjuk a transzformátor kivezetéseihez. Egy mérővezeték 0,5 m hosszú, egyik végén Neutrik NL4FC csatlakozó található, másik végén pedig BU102 nagy méretű műanyag burkolatú mérőcsipesz. A mérőcsipeszek segítségével csatlakoztatjuk a modulokat a vizsgálni kívánt berendezéshez. [7]

A földelő vezetékek egyik végét az aktív mérőfejekben található csavaros kivezetésekhez kell csatlakoztatni, a másik végét pedig annak az átvezető szigetelőnek a földelt aljzatához, ami ahhoz a kivezetéshez tartozik, amelyet az adott mérőfej vizsgál. A földelő vezetékek $d = 10 \text{ mm}^2$ átmérőjű csupasz rézsodronyok, amelyek egyik végén BU120 nagy méretű műanyag burkolatú csipesz található. A nagyfrekvenciás reprodukálhatóság érdekében fokozottan ügyelni kell arra, hogy a csatlakoztatás az előző méréshez hasonló módon történjen. [7]

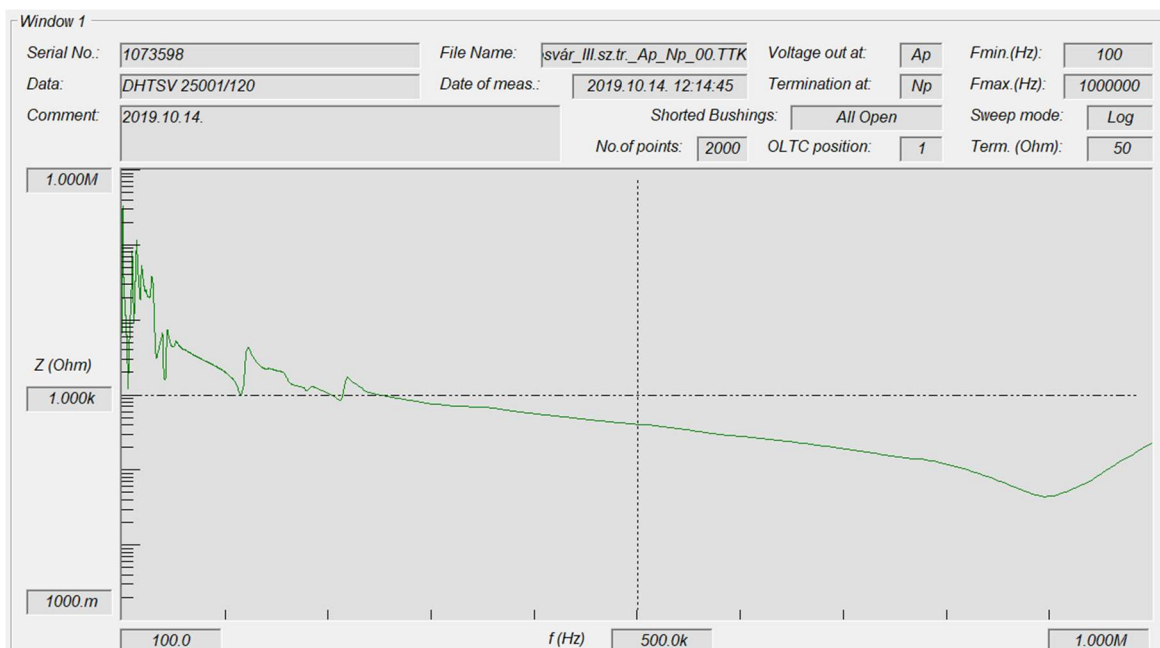
A műszer 230 V kisfeszültségű 50 Hz frekvenciájú hálózati tápfeszültséget igényel, illetve a hálózatról felvett árama 1 A, továbbá rendelkezik érintésvédelmi védőföldeléssel. Az aktív mérőfejek mérőfeszültsége 5 V, változtatható frekvenciával rendelkezik, amelyet meghatározott lépésközökkel változtat a műszer 100 Hz értéktől 1 MHz értékig. Fontos megjegyezni, hogy ilyen kis feszültség és áramértékek mellett is a transzformátor fel-, vagy

letranszformálhatja a feszültséget, ebből következik, hogy kellő elővigyázatossággal kell kezelni a transzformátor kivezetéseit a mérés közben. [7]

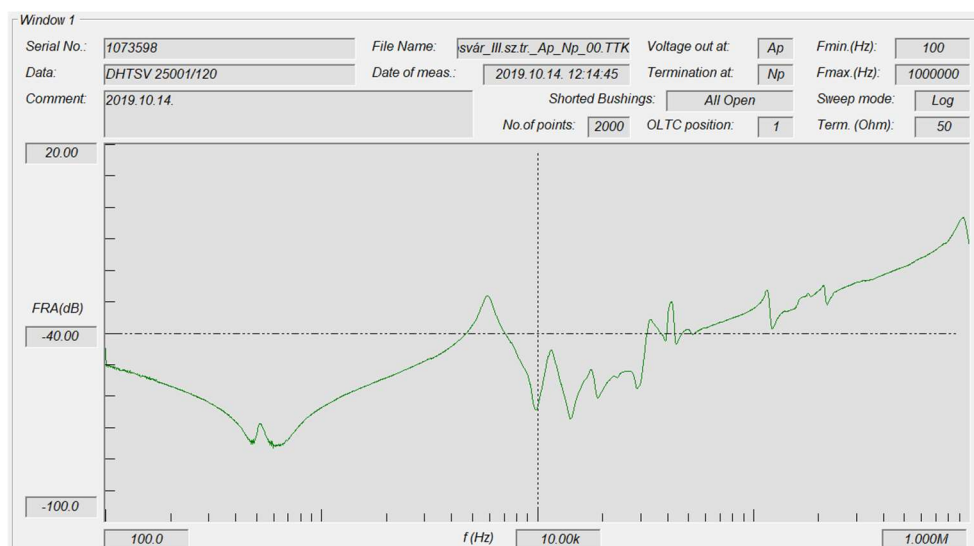
A műszer működéséhez és vezérléséhez egy vezérlő számítógépre van szükség, ami Ethernet kábellel csatlakozik a műszerhez, a kommunikáció TCP/IP protokoll alkalmazásával történik. A vezérlő számítógépen a Traftek által fejlesztett szoftver fut (Traftek 4v2), amely vezérli a műszert, kirajzolja a műszer által felvett mérési eredményekből az impedancia-frekvencia jelleggörbét, továbbá a mérési eredményeket .xls file formátumban képes menteni, amelyet táblázatkezelő szoftverek tudnak olvasni, illetve szerkeszteni. A jelleggörbe frekvencia tengelye felrajzolható a 2.3.2-3. ábrán látható logaritmikus, illetve a 2.3.2-4. ábrán látható lineáris skálázással. A jelleggörbe impedancia tengelye felvehető a 2.3.2-3. és a 2.3.2-4. ábrán látható ohmban (Ω) meghatározott impedancia értékekkel, illetve a 2.3.2-5. ábrán látható decibelben (dB) meghatározott amplitúdó értékekkel. Impedancia-frekvencia jelleggörbe felvétele mellett a műszer a fázisszög értékeket is vizsgálja, amely eredményeiből a szoftver képes felrajzolni a fázismenetet is, amely a 2.3.2-6. ábrán látható, a felső képen logaritmikus, az alsó képen pedig lineáris frekvencia tengelyt alkalmazva. [7]



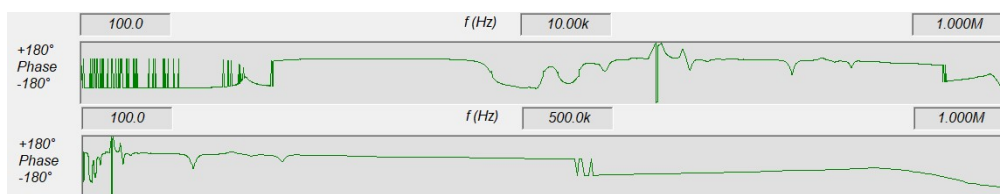
2.3.2-3. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbe felvétele logaritmikus frekvencia, illetve ohmban meghatározott impedancia tengellyel



2.3.2-4. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbék felvétele lineáris frekvencia, illetve ohmban meghatározott impedancia tengellyel



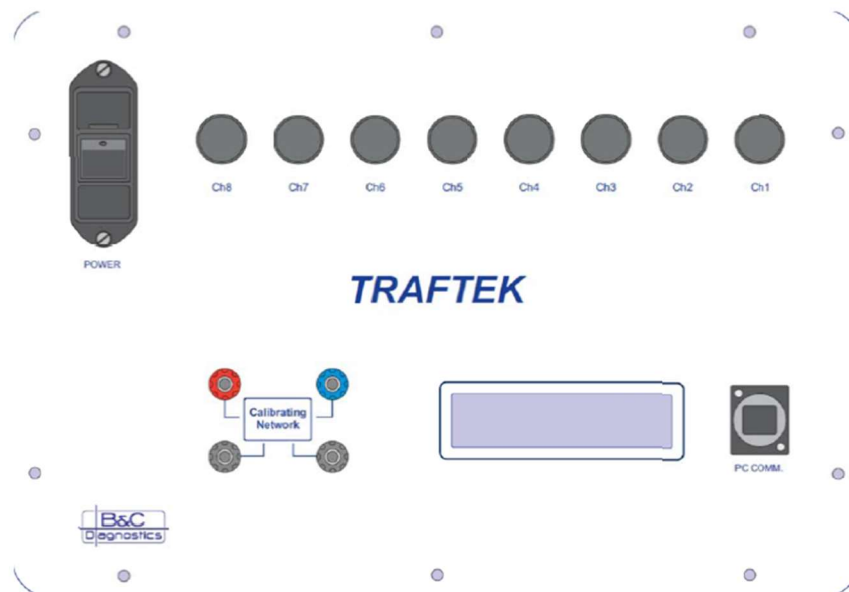
2.3.2-5. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbe felvétele logaritmus frekvencia, illetve decibelben meghatározott amplitúdó tengellyel



2.3.2-6. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbe fázismenete felül logaritmus, alul lineáris frekvencia tengelyt alkalmazva

Az alábbi 2.3.2-7. ábrán látható a műszeren előlapja, amelyen a hálózati csatlakozó és kapcsoló egység, az LCD kijelző, a kommunikációs bemenet – PC COMM. Ethernet csatlakozó

aljzat –, a kalibrációs hálózat – amely segítségével a műszer működőképességét lehet ellenőrizni –, illetve a nyolc darab mérő modul bemenet található – amelyekhez csatlakoztatjuk az RJ45 mérőkábeleket –.[7]



2.3.2-7. ábra Traftek 4.2.27 műszer előlapjának rajza

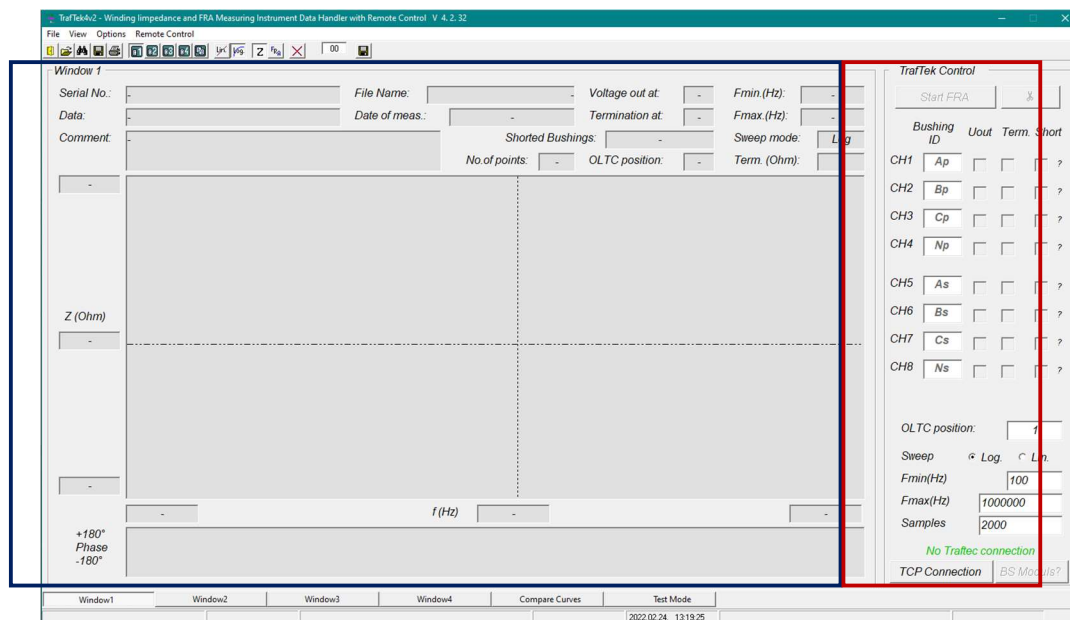
A vizsgálat összeállítása a következő: A vezérlő számítógépet összekötjük a műszerrel, és a számítógépen beállítjuk a megfelelő hálózati paramétereket. A továbbiakban a modulokat csatlakoztatni kell a transzformátor átvezető szigetelőire csipesz végződésű mérővezetékek segítségével. Célszerű a modulokat sorban elhelyezni a színsorrend betartása mellett, mivel a mérések összehasonlításakor csökken a tévesztés kockázata. A modulok kiosztása csillag-csillag kapcsolású háromfázisú transzformátorok esetén a következő: [7]

- Az első modul a nagyobb feszültségű oldali 1U betűvel jelölt fázis tekercs átvezető szigetelőjére csatlakozik. Színjelölése: zöld.
- A második modul a nagyobb feszültségű oldali 1V betűvel jelölt fázis tekercs átvezető szigetelőjére csatlakozik. Színjelölése: sárga.
- A harmadik modul a nagyobb feszültségű oldali 1W betűvel jelölt fázis tekercs átvezető szigetelőjére csatlakozik. Színjelölése: piros.
- A negyedik modul a nagyobb feszültségű oldali 1N betűvel jelölt csillagpontra csatlakozik. Színjelölése: kék.
- Az ötödik modul a kisebb feszültségű oldali 2U betűvel jelölt fázis tekercs átvezető szigetelőjére csatlakozik. Színjelölése: zöld.
- A hatodik modul a kisebb feszültségű oldali 2V betűvel jelölt fázis tekercs átvezető szigetelőjére csatlakozik. Színjelölése: sárga.
- A hetedik modul a kisebb feszültségű oldali 2W betűvel jelölt fázis tekercs átvezető szigetelőjére csatlakozik. Színjelölése: piros.
- A nyolcadik modul a kisebb feszültségű oldali 2N betűvel jelölt csillagpontra csatlakozik. Színjelölése: kék. [21]

Ha valamely tekercselés kapcsolásából adódóan nem rendelkezik csillagponttal akkor a kék színjelölésű modulokat nem alkalmazzuk. Az utolsó színjelöléssel rendelkező eszköz a földelését biztosító csipeszes végződésű csupasz sodrony, amely fekete színjelöléssel van

ellátva. Továbbiakban az RJ45 jelű mérővezetékek segítségével csatlakoztatjuk a műszert és a modulokat a vizsgálandó transzformátorhoz. [7]

Az 2.3.2-8. ábrán látható a Traftek 4v2 szoftver felülete, amely segítségével vezérelhetjük a műszert, kiértékelhetjük a vizsgálat eredményeit, illetve exportálhatjuk táblázat vagy jegyzőkönyv formátumban is. Az ábrán kékkel bekeretezve látható a felhasználói szoftverfelület azon része, amely a mérési eredmények megjelenítésére és kiértékelésére szolgál, pirossal bekeretezve pedig a műszer vezérlésére szolgáló felhasználói szoftverfelület. [21]



2.3.2-8. ábra Traftek 4v2 szoftver felhasználói felülete

A vezérlő számítógép kommunikációs csatlakoztatása a műszerhez a 2.3.2-8. ábra jobb alsó sarkában látható *TCP Connection* gomb megnyomásával történik. A fent említett gomb mellett található a *BS Modul?* gomb. Ezen gomb megnyomásával a műszer csatornák szerint sorban bekapcsolja a csatornákra csatlakoztatott modulokat, és lekérdezi, illetve kijelzi az egyes modulok egyedi azonosítóit. A minden egyes modul a vezérlő számítógép minden egyes parancsát megkapja, de az egyes modulok csak azon parancsokat hajtják végre, amelyek az adott modulhoz tartozó azonosítóval vannak ellátva. A *Bushing ID* jelölésű oszlopban találhatók a transzformátor egyes kivezetéseinek jelölései, színjelölésük a hozzájuk kapcsolt modulok színeivel egyeznek meg, a színjelölés csak akkor jelenik meg ha a műszer észlelte az adott modult, ha nem akkor szürke marad, ezen jelölések rendre a következők: [7]

- *Ap* jelölés a primer oldali 1U jelű tekercshez tartozik, színjelölése zöld.
- *Bp* jelölés a primer oldali 1V jelű tekercshez tartozik, színjelölése sárga.
- *Cp* jelölés a primer oldali 1W jelű tekercshez tartozik, színjelölése piros.
- *Np* jelölés a primer oldali csillagponthoz tartozik, színjelölése kék.
- *As* jelölés a szekunder oldali 2U jelű tekercshez tartozik, színjelölése zöld.
- *Bs* jelölés a szekunder oldali 2V jelű tekercshez tartozik, színjelölése sárga.
- *Cs* jelölés a szekunder oldali 1W jelű tekercshez tartozik, színjelölése piros.
- *Ns* jelölés a szekunder oldali csillagponthoz tartozik, színjelölése kék.

A modulok felismertetése után a szoftveren belül ki kell választani milyen mérési elrendezésben szeretnénk végezni a vizsgálatot. A 2.3.2-8. ábrán pirossal bekeretezett felületén ki lehet választani, hogy az adott modul milyen mérési funkciót lásson el az *Uout*, *Term.*, és

Short jelzésű oszlopokban. *Uout* funkciót kiválasztva a műszer az adott átvezetőre feszültséget kapcsol, a *Term.* funkciót kiválasztva pedig az adott átvezetőn fog záródni az áramkör, tehát az *Uout* és a *Term.* funkció „pontjai között” történik a mérés. A *Short* funkcióval a kijelölt átvezetőket a műszer rövidre zárja és földeli. Ha egy adott modul mellett egyik funkció sincs kijelölve akkor ehhez a modulhoz tartozó átvezetőt a műszer nem kezeli, tehát a vizsgálatban nem játszik szerepet. A pirossal bekeretezett felületen találhatók még egyéb beállítási lehetőségek. Beállítható a fokozatkapcsoló álláshelyzete (*OLTC position*), beállítható, hogy a frekvencia elosztás lineáris vagy logaritmikus legyen (*Sweep*), beállítható a kezdő frekvencia és a felvett utolsó frekvencia értéke, amelyen a műszer mintát vesz, továbbá beállítható a mintavételezés száma, tehát hogy a frekvenciaérték változtatás mellett a vizsgálat ideje alatt hányszor mérjen a műszer. [7]

A műszeren számos mérési elrendezés kialakítható. Leggyakrabban úgynevezett *End to End* mérést alkalmaznak, amelynek lényege, hogy a műszer egy tekercs kezdőkapcsának kivezetésére és végkapcsának kivezetésére kapcsol mérőfeszültséget, az ellentétes oldali tekercselés kivezetéseit pedig nyitott állapotban vagy rövidrezárt és földelt állapotban lehet hagyni. Ezen tényező befolyásolja a görbéket ezért minden egyes mérést megcsinálnak mind a két lehetőséggel. Ritkán alkalmaznak még úgynevezett *Inductive interwinding* mérést, illetve *Capative interwinding* mérést is. A 2.3.2-9. ábrán látható az ajánlott mérési elrendezések egy Yd11 kapcsolási csoportú transzformátoron. [7]

Mérési típus	Uout	Term	Short	Fokozat	
End-to-End	Ap	Np		10	
End-to-End	Bp	Np		10	
End-to-End	Cp	Np		10	
End-to-End	Ap	Np		1	
End-to-End	Bp	Np		1	
End-to-End	Cp	Np		1	
End-to-End + Short	Ap	Np	As+B _s +C _s	1	
End-to-End + Short	Bp	Np	As+B _s +C _s	1	
End-to-End + Short	Cp	Np	As+B _s +C _s	1	
End-to-End	As	Bs		1	
End-to-End	Bs	Cs		1	
End-to-End	Cs	As		1	
End-to-End + Short	As	Bs	Ap+B _p +C _p +N _p	1	
End-to-End + Short	Bs	Cs	Ap+B _p +C _p +N _p	1	
End-to-End + Short	Cs	As	Ap+B _p +C _p +N _p	1	
Inductive Interwinding	Ap	Cs	N _p +A _s	1	
Inductive Interwinding	Bp	As	N _p +B _s	1	
Inductive Interwinding	Cp	Bs	N _p +C _s	1	
Capacitive Interwinding	Ap	Cs		1	
Capacitive Interwinding	Bp	As		1	
Capacitive Interwinding	Cp	Bs		1	

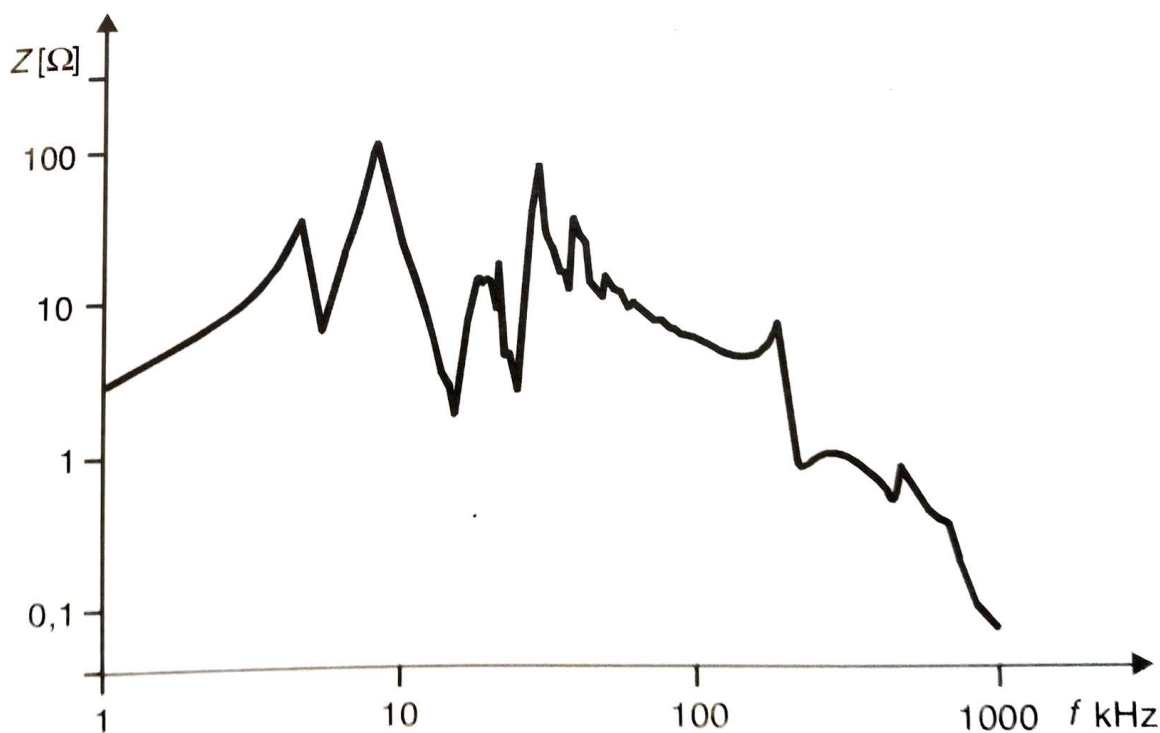
2.3.2-9. ábra Yd11 kapcsolási csoportú transzformátorok vizsgálatára ajánlott mérési elrendezések [7]

2.3.3 Transzformátor aktív rész tekercselésének impedancia-frekvencia jelleggörbéinek felvétele

Transzformátorok tekercselése a vasmag inductívitás növelő hatásának és a kis menetek, illetve egyes tekercsek közötti szigetelések közti kapacitások kis értéke miatt, a transzformátor aktív rész tekercselésének impedanciája normál üzemi frekvencián inductív jellegű. A frekvenciát növelve rezonancia pontokon megyünk keresztül, ahol az impedancia-frekvencia jelleggörbe helyi szélső értéket vesz fel. A frekvenciát tovább növelve az impedancia jellege kapacitív jellegűvé válik, mivel 100 kHz nagyságrendű nagyobb frekvenciákon a tekercsek inductívitása már csak a menetek szórt fluxusától függ, tehát az inductív reaktancia értéke nagyon kicsi lesz, a kapacitív reaktancia pedig növekszik. [2]

A transzformátor vasmagjának középső oszlopán elhelyezett tekercselések impedancia-frekvencia jelleggörbéje nem ugyan olyan, mint a szélső oszlopokon elhelyezkedő tekercseléseké, ennek oka, hogy a vasmag belső és a két külső oszlopának mágneses körei eltérnek egymástól. Továbbá az impedancia-frekvencia görbét befolyásolják még a fokozatkapcsolók tekercselései és kivezetései is. Ez fázisonkénti eltéréseket is okozhat, mert az egyes fázistekercsekre ráhúzott fokozatkapcsolók bekötő vezetékének hossza fázisonként eltér. Ezen okoknál fogva az egyes fázistekercsek impedancia-frekvencia jelleggörbéi rendellenességmentes állapotban is eltérnek kissé, nagy eltérésből viszont a tekercsek káros deformálódására lehet következtetni. [2]

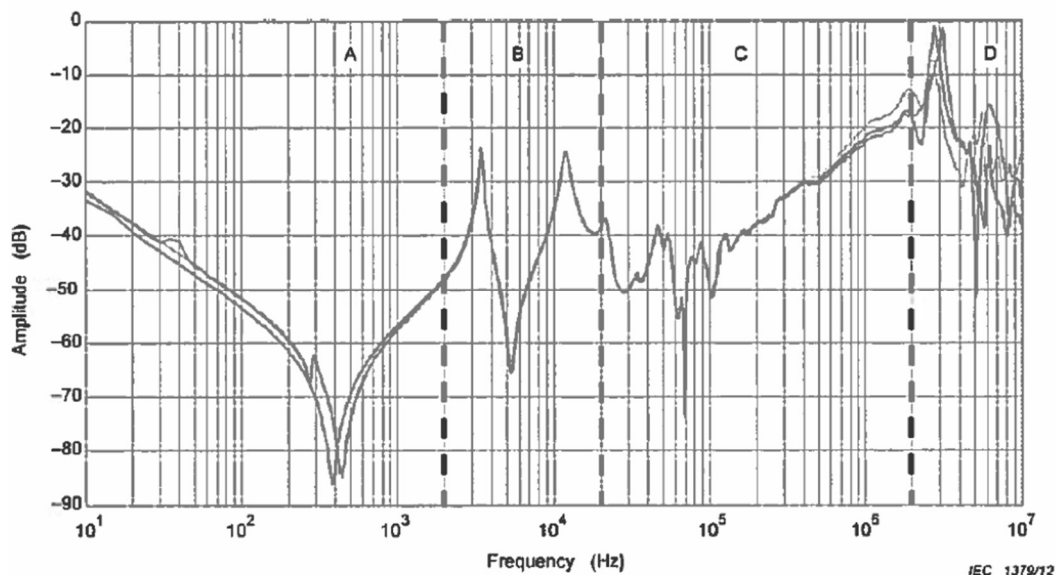
Az 2.3.3-1. ábrán látható egy transzformátor impedancia-frekvencia jelleggörbéje.



2.3.3-1. ábra Transzformátor impedancia-frekvencia jelleggörbéje [1]

Javasolt impedancia-frekvencia jelleggörbék felvételekor figyelni a kiegészítő delta tekercselésre – ha a mérendő gép rendelkezik kiegészítő delta tekercseléssel –, mivel a járomfluxus kioltó hatásának következtében mérési hibákat visz a rendszerbe. Célszerű jelleggörbéket a kiegészítő delta tekercselés kivezetését nyitott és zárt állapotában is felvenni.

Az 2.3.3-2. ábrán látható módon a transzformátorok impedancia-frekvencia jelleggörbéit a frekvencia szempontjából négy fő szakaszra bonthatjuk fel. Az egyes szakaszok alsó és felső frekvenciahatára úgy lett meghatározva, hogy az egyes szakaszokban milyen frekvenciafüggő elemek dominálnak. A frekvenciák jelentős mértékben függenek a transzformátor méretétől. [2]



2.3.3-2. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbék felosztás a frekvenciák szempontjából [2]

Az *A* betűvel jelölt szakaszt alacsonyfrekvenciás tartománynak nevezzük, a frekvenciatartománya 10 Hz-től 2 kHz. Az alacsonyfrekvenciás tartományban a vasmag frekvenciafüggő hatásai határozzák meg jelentősen a görbe értékeit. Tehát függ a vasmag mágnesező indukciójától, a kapacitásától és a permanens mágnesességétől is. Három oszlopos transzformátor esetén a külső fázisok kettő, míg a középső fázis egy rezonancia ponttal rendelkezik, mivel a középső fázis mágneskörei szimmetrikusan záródnak a két szélső fázis oszlopán keresztül. [7]

A *B* betűvel jelölt szakaszt középső tartománynak nevezzük, a frekvenciatartománya 2 kHz-től 20 kHz. A középső tartományban a tekercsek közötti induktív csatolás frekvenciafüggő hatása határozza meg a görbe értékeit. Mag típusú transzformátoroknál ezen frekvenciatartományon belül egy rezonanciapont, takarékkapcsolású transzformátorok esetén pedig két rezonanciapont jellemző. [8]

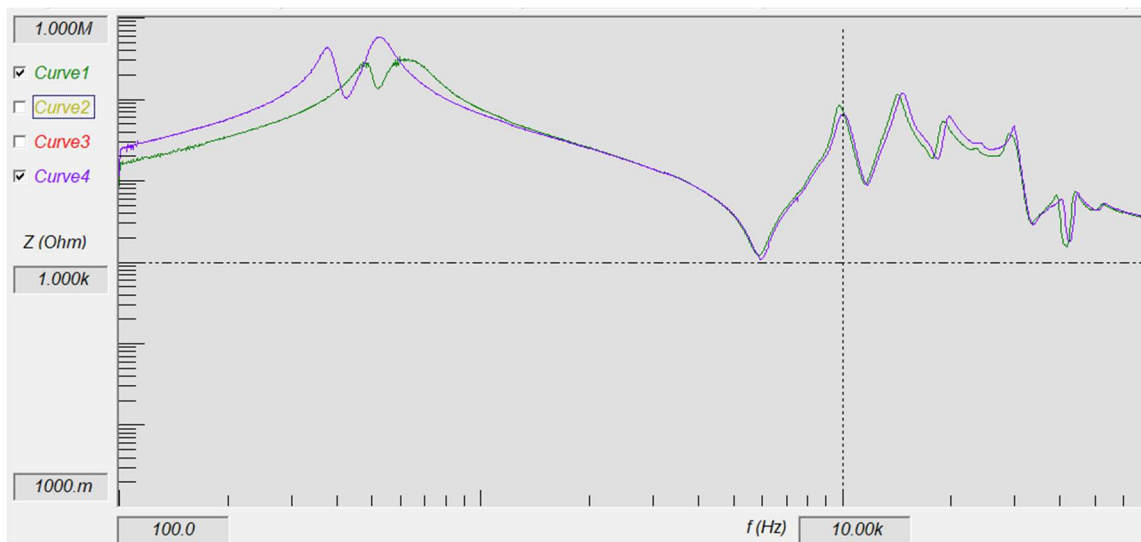
A *C* betűvel jelölt szakaszt nagyobb frekvenciás tartománynak nevezzük, a frekvenciatartománya 20 kHz-től 2 MHz. A nagyobb frekvenciás tartományban a tekercsek belső tulajdonságai, tehát a szórési induktivitások, soros-, és földkapacitások határozzák meg a görbe értékeit, legjelentősebb mértékben a soroskapacitások. Nagy kapacitással rendelkező transzformátorok esetén ezen tartományban több rezonanciás pont van növekvő amplitúdóval. Kisebb feszültségű tekercseknél a soroskapacitás kicsi ebből következik, hogy ezen frekvenciatartományban lapos görbe lesz jellemző. [8]

A *D* betűvel jelölt szakaszt nagyfrekvenciás tartománynak nevezzük, a frekvenciatartománya 2 MHz-től értendő. A nagyfrekvenciás tartományban a mérési elrendezés nagyfrekvenciára jellemző frekvenciafüggő tulajdonságai határozzák meg a görbe értékeit. A mérési elrendezés véletlenszerűsége miatt ezen frekvenciatartományban a mérési elrendezés

nehezen reprodukálható. Ebből következik, hogy impedancia-frekvencia jelleggörbét 1 MHz frekvenciaértékig veszünk fel. [8]

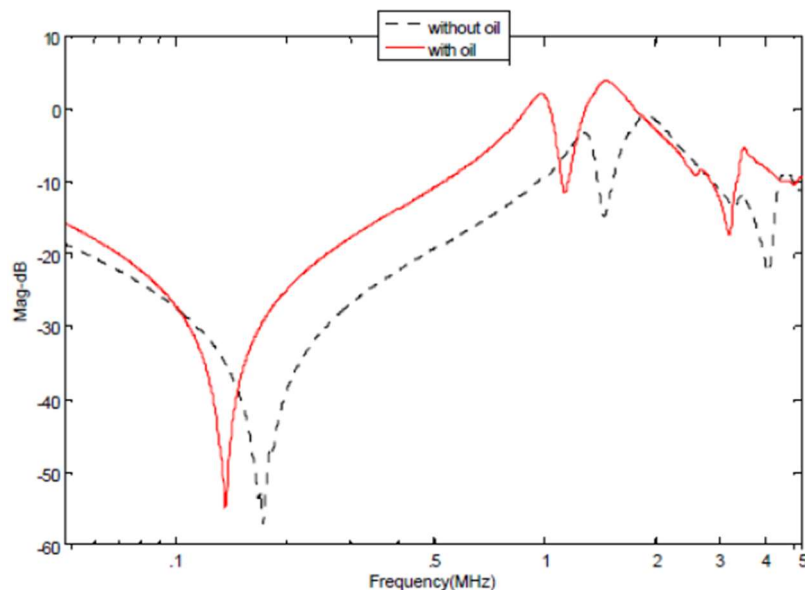
Az impedancia-frekvencia jelleggörbék alakja nem csak a transzformátor aktív rész tekercselésének geometriai elváltozásától függ, vannak egyéb befolyásoló tényezők amelyeket az impedancia-frekvencia jelleggörbék felvételénél és kiértékelésénél figyelembe kell venni. Ezen befolyásoló tényezők a következők: [8]

- A vasmag remanens fluxusa (fennmaradt mágnesesség)
 - Ha a vizsgálat elvégzése előtt a transzformátoron nem történt lemágnesezés feszültségmentesítéskor, akkor a vasmagban lévő remanens fluxus hatására a tekercselésben indukálódó feszültség egyenáramú offsetként jelenik meg a jelleggörbében. Ezen jelenség az impedancia-frekvencia jelleggörbében az alacsonyfrekvenciás tartományban – *A* szakaszban – okoz eltéréseket. Az eltérés értéke egyenesen arányos remanens fluxus értékével. Az eltérés összehasonlítása egy referenciagörbével az 2.3.3-3. ábrán látható, a referencia görbe zöld, a vasmag remanens fluxusa által alacsonyfrekvenciás tartományban eltolódott görbe pedig lila színnel van jelölve. [8]



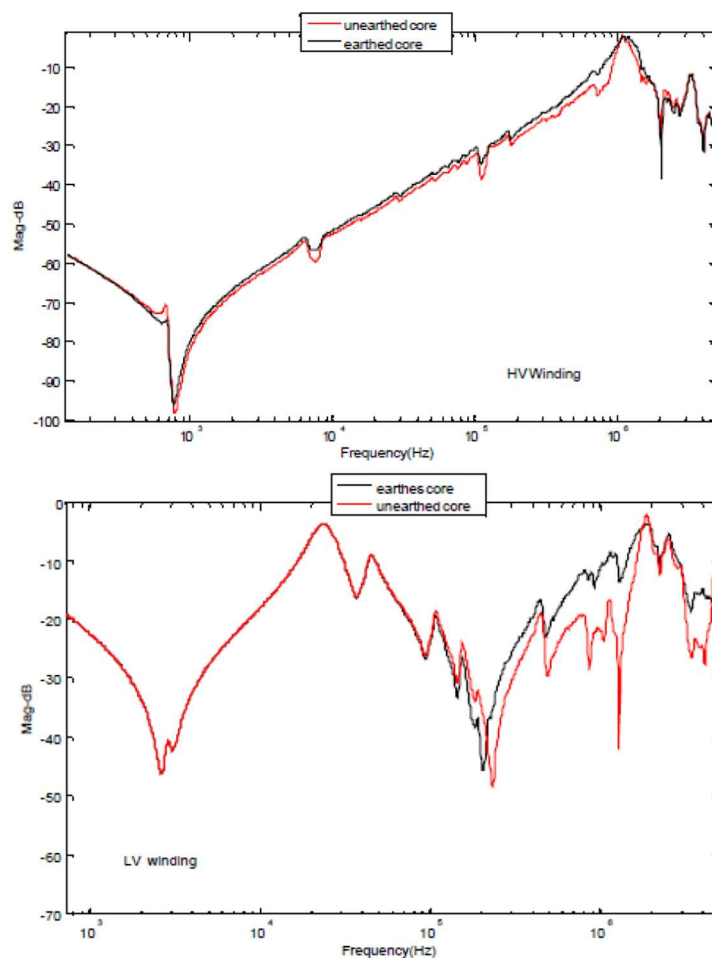
2.3.3-3. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbe eltolódása a vasmag remanens fluxusának hatására

- Olaj nélküli állapot
 - Ha a transzformátoron elvégzett próbatermi vizsgálatok során az impedancia-frekvencia jelleggörbét olaj nélküli állapotban vették fel, akkor a görbe nagyobb frekvenciás tartományban – *C* szakaszban – az 2.3.3-4. ábrán látható módon eltolódik a magasabb impedanciaértékek irányába, illetve a kisebb erősítés értékek irányába. Az ábrán az olaj nélküli állapot görbéje *without oil* jelzővel van ellátva és szaggatott vonallal, az olajjal feltöltött állapot görbéje pedig *with oil* jelzővel és piros színű folytonos vonallal van jelölve. [8]



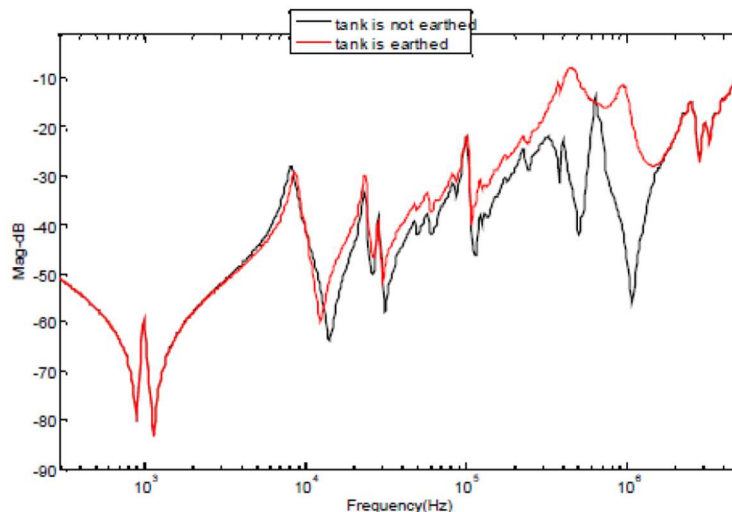
2.3.3-4. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbe eltolódása az olajnélküli állapot hatására [2]

- A vasmag földelésének megszűnése
 - A vasmag földelése megszűnik ha a vasmag és a fedlap földelésre szolgáló összeköttetése, vagy a fedlap és a tank földelésre szolgáló összeköttetése megszakad. A vasmag földelés megszűnésének hatására a nagyobb feszültségű oldali tekercselés impedancia-frekvencia jelleggörbéje a kisebb erősítés értékek felé tolódik el, tehát a nagyobb impedanciaértékek felé, a kisebb feszültségű tekercselés impedancia-frekvencia jelleggörbéje a 100 kHz feletti frekvenciatartományban a nagyobb erősítések irányába tolódik el, a rezonanciapontokat pedig kisebb frekvenciaértéken veszi fel. Az 2.3.3-5. ábrán felül a nagyobb feszültségű oldali tekercselés görbéi, alul pedig a kisebb feszültségű oldali tekercselés görbéi láthatók. Az ábrán piros színnel és *unearthed core* jelöléssel van ellátva a földeletlen vasmagra vonatkozó impedancia-frekvencia jelleggörbe, a fekete színnel és *earthed core* jelzővel ellátott görbe pedig a földelt vasmagra vonatkozó impedancia-frekvencia jelleggörbe. [8]



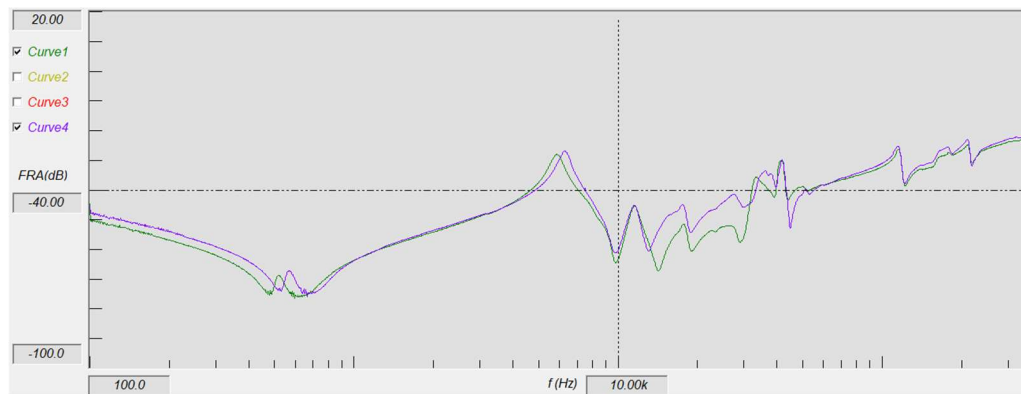
2.3.3-5. ábra Impedancia frekvencia jelleggörbék eltolódása a vasmag földelése megszűnésének hatására [2]

- A tank földelésének megszűnése
 - A tank földelése megszűnésének hatására az impedancia frekvencia jelleggörbében az 2.3.3-6. ábrán látható jelentős változások figyelhetők meg. Már kb. az 5 kHz frekvenciaértéktől kezdődően csökken az erősítés értéke, és a rezonanciapontok jelentősebben kirajzolódnak a görbében. Az ábrán fekete színnel és *tank is not earthed* jelöléssel van ellátva a földeletlen tankra vonatkozó impedancia-frekvencia jelleggörbe, a piros színnel és *tank is earthed* jelzővel ellátott görbe pedig a földelt tankra vonatkozó impedancia-frekvencia jelleggörbe. [8]



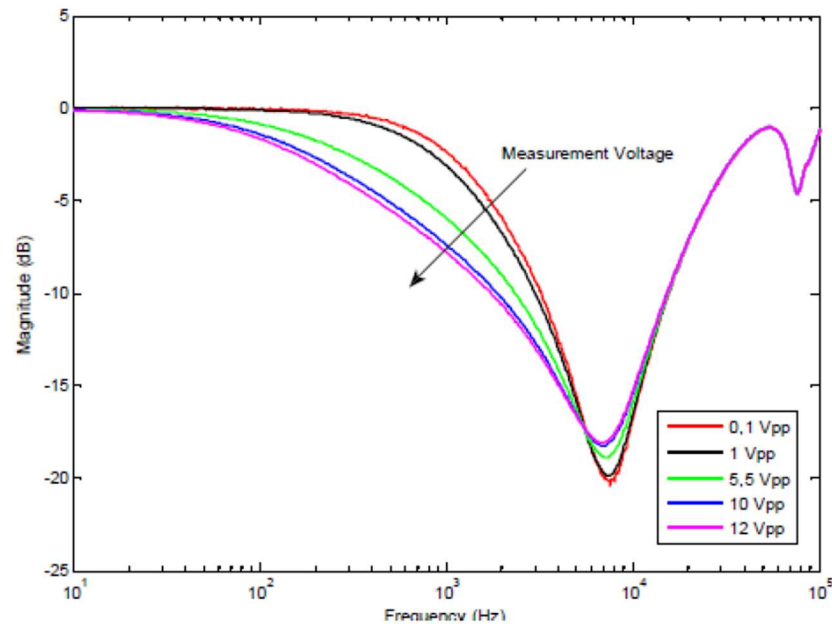
2.3.3-6. ábra Impedancia frekvencia jelleggörbék eltolódása a tank földelése megszűnésének hatására [2]

- A fokozatkapcsoló álláshelyzete
 - A fokozatkapcsoló az áttétel megváltoztatásával megváltoztatja a tekercs hosszát, ez az 2.3.3-7. ábrán látható módon befolyásolja az impedancia-frekvencia jelleggörbét. Nagyobb fokozatban a 10 kHz-ig tartó frekvenciatartományban megnő az erősítés és a görbe a nagyobb frekvenciák felé tolódik el. A 10 kHz feletti tartományban a görbe a rezonanciapontjait kisebb frekvenciaértékeken veszi fel. Az ábrán zöld színnel van jelölve a fokozatkapcsoló 1-es állásában felvett impedancia-frekvencia jelleggörbe, lila színnel pedig a fokozatkapcsoló 14-es állásában felvett impedancia-frekvencia jelleggörbe. [8]



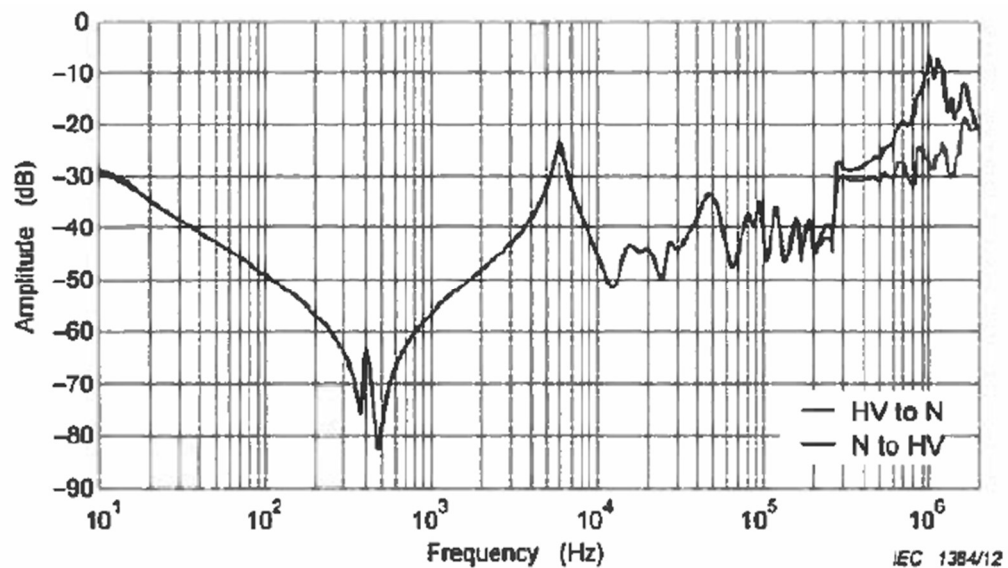
2.3.3-7. ábra Impedancia frekvencia jelleggörbék eltolódása a fokozatkapcsoló álláshelyzetének függvényében

- Mérési feszültség értéke
 - A mérési feszültség változtatásának hatására az alacsonyfrekvenciás szakasz meredeksége változik meg az 2.3.3-8. ábrán látható módon. [8]



2.3.3-8. ábra Impedancia frekvencia jelleggörbék eltolódása a mérési feszültség változtatásának függvényében [2]

- Mérés iránya
 - A mérés iránya felcserélhető, de ennek hatására a görbe nagyfrekvenciás tartományában jönnek létre változások. Ezen jelenség az 2.3.3-9. ábrán látható. [2]



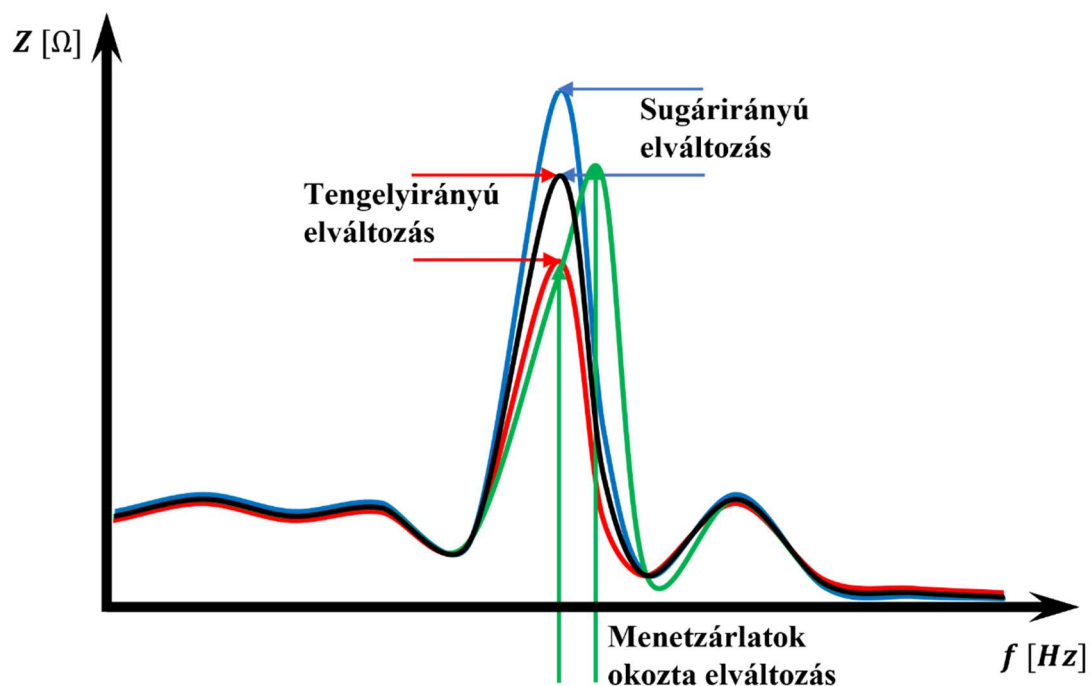
2.3.3-9. ábra Impedancia frekvencia jelleggörbék eltolódása a mérési irány függvényében [2]

2.3.4 Vizsgálat kiértékelése

A vizsgálatok során felvett impedancia-frekvencia jelleggörbék kiértékelése összehasonlításra alapul. A jelenlegi felvett jelleggörbét hasonlítják a korábbi évek során végzett vizsgálatok görbéivel, illetve, ha nem áll rendelkezésre korábbi mérés eredmény akkor a vizsgált géppel azonos típusú transzformátorok vizsgálata során felvett jelleggörbékkel lehetséges az összehasonlítás. Ezen összehasonlítás során megállapítható, hogy a

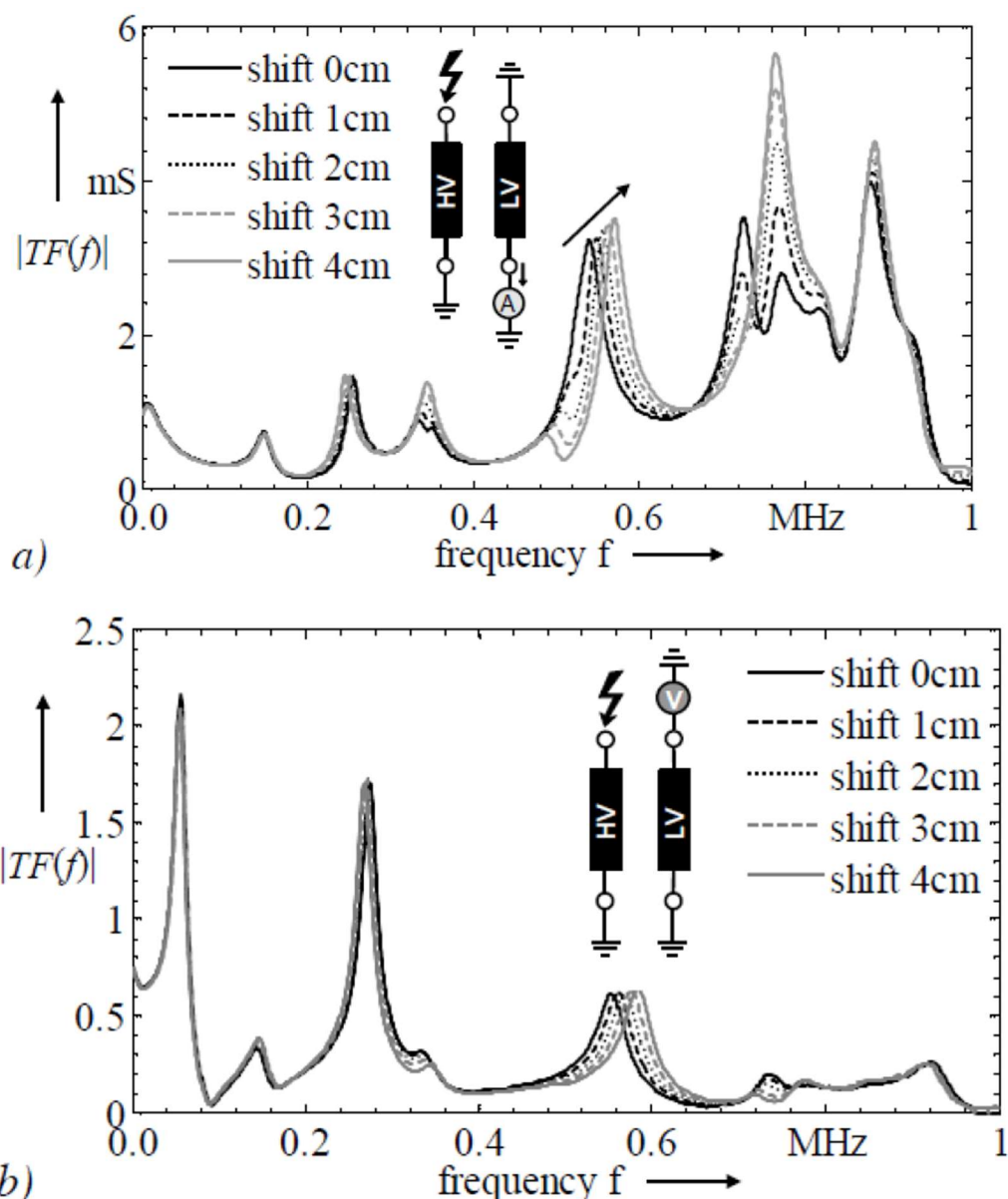
transzformátor üzemelése közben történt-e mechanikai elváltozás a transzformátor tekercselésében. Továbbá összehasonlítják egymással az egyes fázisok tekercselésének impedancia frekvencia görbéit is. Az aktív rész tekercselésének mechanikai deformációja úgy mutatható ki a frekvenciamenetben, hogy vizsgáljuk a vágási frekvenciákat és az egyes vágási frekvenciákon történő impedanciaérték változásokat. Tehát a frekvenciamenetben történő változás a két vizsgálat görbéiben minél kisebb vágási frekvencián következik be annál nagyobb a geometriai elváltozás. Összehasonlításnál a spektrumgörbe teljes alakját, a rezonancia helyek számát, rezonanciafrekvenciák eltolódását kell figyelni. Fontos megjegyezni, hogy a vizsgálat erősen függ a mérő vezetékek elrendezésétől, ezért törekedni kell az azonos mérési elrendezés kialakítására. [2]

Az 2.3.4-1. ábrán látható, hogy a transzformátorok tekercselésének egyes geometriai elváltozásai hogyan változtatják meg a tekercsek impedancia frekvencia jelleggörbéit. Az ábrán fekete vonallal van feltüntetve az a referencia görbe, amelyhez az egyes geometriai elváltozásokhoz tartozó görbéket hasonlítjuk. Kék vonallal a sugárirányú geometriai elváltozás után felvett impedancia-frekvencia görbe látható. Sugárirányú elváltozás esetén egy adott frekvencián az impedancia értéke megnövekszik. Piros vonallal van jelölve a tengelyirányú elmozdulás után felvett görbe. Tengelyirányú elmozdulás hatására a görbe úgy változik, hogy adott frekvencián az impedancia értéke a hibamentes állapothoz képest csökken. A zöld vonallal jelölt menetzárlatok okozta elváltozás hatására az impedancia-frekvencia jelleggörbe a helyi maximum szélsőértékeit nagyobb frekvencia értéknél veszik fel, mint a referenciagörbe. [2]



2.3.4-1. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbe változásai geometriai elváltozások hatására [2]

Az 2.3.4-2. ábrán példaként látható, hogy hogyan változik a kisebb feszültségű és a nagyobb feszültségű tekercs közötti tengelyirányú (axiális) geometriai elmozdulásának hatására az *a*, ábrán látható átvitt kimenő áram impedancia-frekvencia jelleggörbéje, és a *b*, ábrán látható az átvitt feszültség impedancia-frekvencia jelleggörbéje. [2]



2.3.4-2. ábra Kisebb feszültségű és nagyobb feszültségű tekercselés közötti tengelyirányú geometriai elválkozás hatására megváltozó átvitt kimenő áram (a, ábra) és átvitt feszültség (b, ábra) impedancia-frekvencia jelleggörbéje [2]

Az alábbi Traftek 4v2 szoftver által exportált jegyzőkönyvek segítségével szeretném bemutatni az impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálatának kiértékelését a gyakorlatban. Az impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat összehasonlításra alapul. Összehasonlítás alapját képezhetik korábbi vizsgálatok, azonos típusú, gyártású transzformátorokon – úgynevezett testvér transzformátorokon – felvett impedancia-frekvencia jelleggörbék – lehetőleg a két összehasonlítandó gép gyártási ideje között kis eltérés legyen, ez a két gép gyári számából következtethető ki –, továbbá, ha egyik sem áll rendelkezésre akkor az egyes fázistekercsek görbéinek összehasonlítása is releváns lehet. A fent említett összehasonlítási módszerek közül a korábbi vizsgálatokkal történő összehasonlítással elemzem a görbéket, mivel rendelkezésre állnak korábbi és későbbi mérési eredmények is.

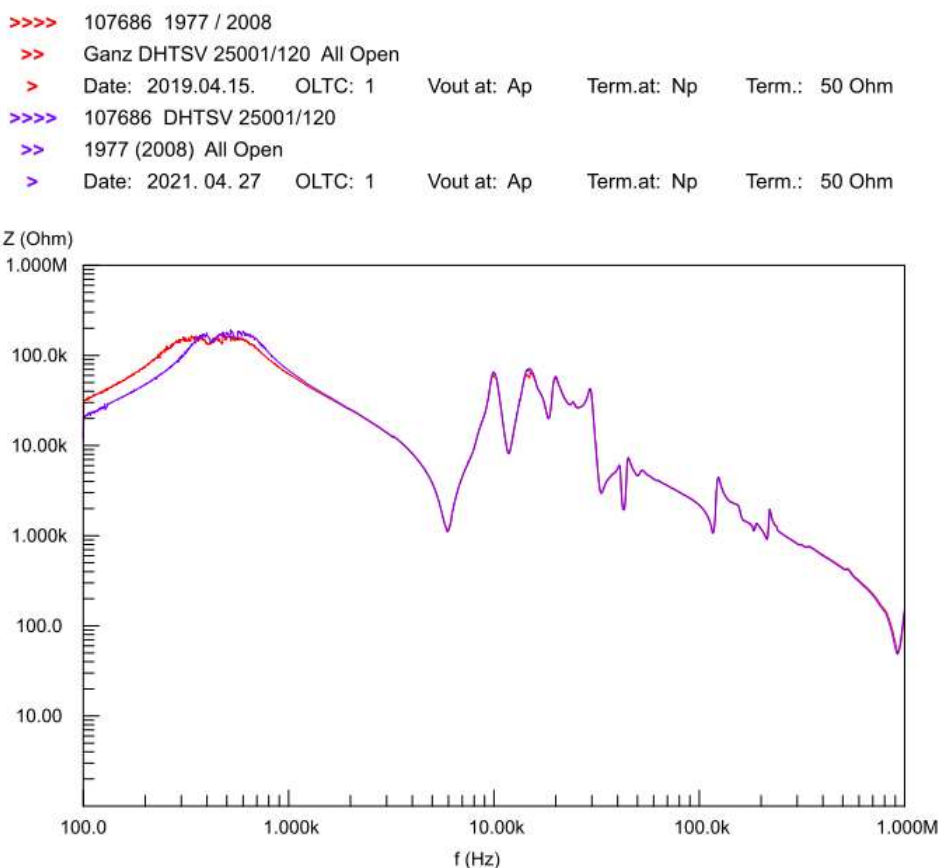
Az alábbi vizsgálatok egy 1977-ben gyártott, 2008-ban felújított Ganz DHTSV 25001/120 típusú 120/22 kV névleges feszültségű YNyn6+d_T kapcsolási csoportú nagy-, és középfeszültségű transzformátoron lettek elvégezve 2019-ben, utána 2021-ben. Az

impedancia-frekvencia jelleggörbék vizsgálatok gyakoriságát a transzformátorok igénybevétele határozza meg, E.ON vállalatoknál kétévente végzik a méréseket.

A mérés mind a két évben a következő elrendezésekben történt minden fázisra azonos módon:

Ap_Np_00:

- Elrendezés:
 - 1U jelű primer fázistekercs vizsgálata az 1U jelű tekercs átvezető szigetelőjén (**Ap**) és a primer oldali csillagpont kivezetésen (**Np**) keresztül, nyitott szekunder kapcsok, és 1-es állású fokozatkapcsoló mellett.
- Vizsgálat eredménye:
 - A vizsgálat Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott jegyzőkönyve a 2.3.4-3. ábrán látható, piros színnel jelölve a 2019-es vizsgálat görbéje, kék színnel pedig a 2021-es vizsgálat görbéje.



2.3.4-3. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Ap_Np_00 mérési elrendezésben

- Kiértékelés
 - A görbék összehasonlításából látható, hogy a 2021-es görbe alacsony frekvenciás tartományban jobbra el van tolódva a nagyobb frekvenciák felé, tehát ugyan azon impedancia értékeket nagyobb frekvenciaérték mellett vesz fel.
 - Az előző pontban említett jelenség a vasmagban megtalálható remanens fluxusok által létrehozott egyenáramú offset következménye lehet.

- Közepes-, nagyobb-, illetve nagyfrekvenciás tartományokban a két görbe megegyező, az eltérés minimális.

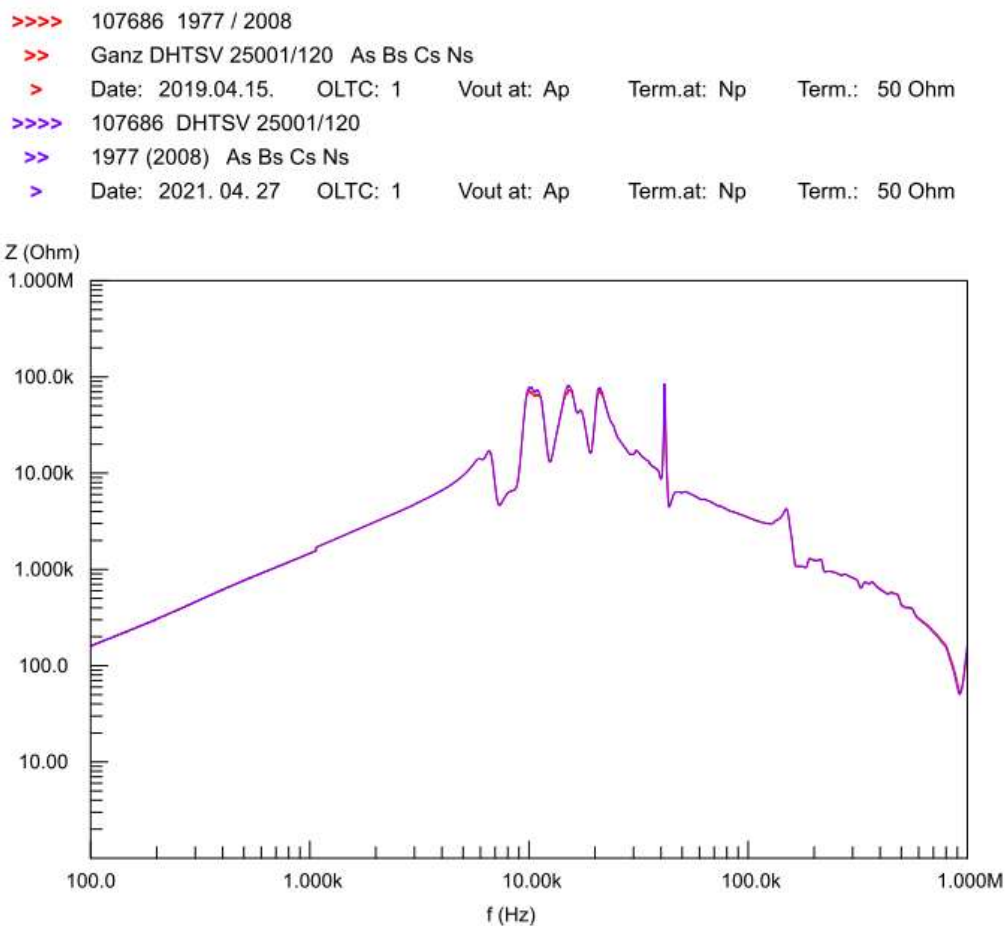
Ap_Np_01

- Elrendezés:

- 1U jelű primer fázistekercs vizsgálata az 1U jelű tekercs átvezető szigetelőjén (**Ap**) és a primer oldali csillagpont kivezetésén (**Np**) keresztül, rövidrezárt szekunder kapcsok, és 1-es állású fokozatkapcsoló mellett.
- . A szekunder kapcsok rövidrezárásával a vasmag remanens fluxusának hatásait nem befolyásolják a görbét, nem játszanak szerepet a görbe felrajzolása során.

Vizsgálat eredménye:

- A vizsgálat Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott jegyzőkönyve a 2.3.4-4. ábrán látható, piros színnel jelölve a 2019-es vizsgálat görbéje, kék színnel pedig a 2021-es vizsgálat görbéje.



2.3.4-4. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Ap_Np_01 mérési elrendezésben

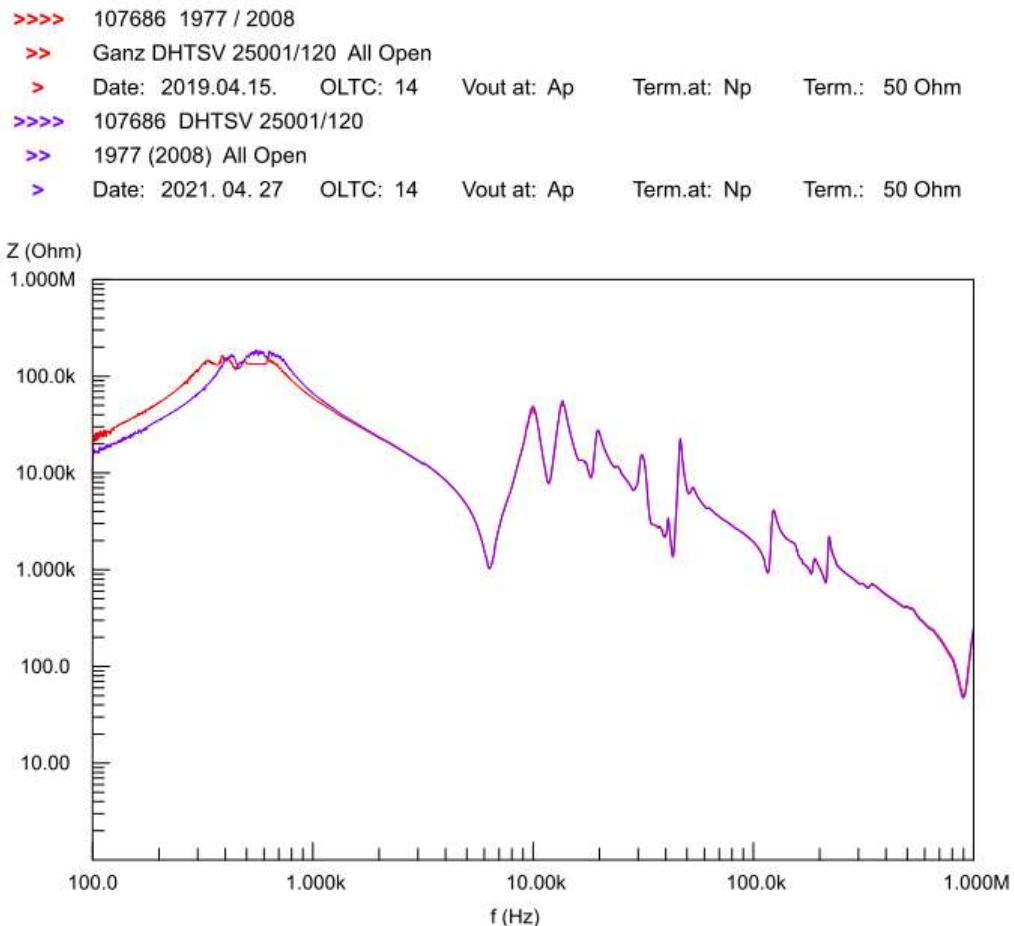
- Kiértékelés

- A görbék összehasonlításából látható, hogy a két görbe megegyezik, az eltérés elhanyagolható.

Ap_Np_02:

- Elrendezés:

- 1U jelű primer fázistekercs vizsgálata az 1U jelű tekercs átvezető szigetelőjén (**Ap**) és a primer oldali csillagpont kivezetésén (**Np**) keresztül, nyitott szekunder kapcsok, és 14-es állású fokozatkapcsoló mellett.
- Vizsgálat eredménye:
 - A vizsgálat Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott jegyzőkönyve a 2.3.4-5. ábrán látható, piros színnel jelölve a 2019-es vizsgálat görbéje, kék színnel pedig a 2021-es vizsgálat görbéje.



2.3.4-5. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Ap_Np_02 mérési elrendezésben

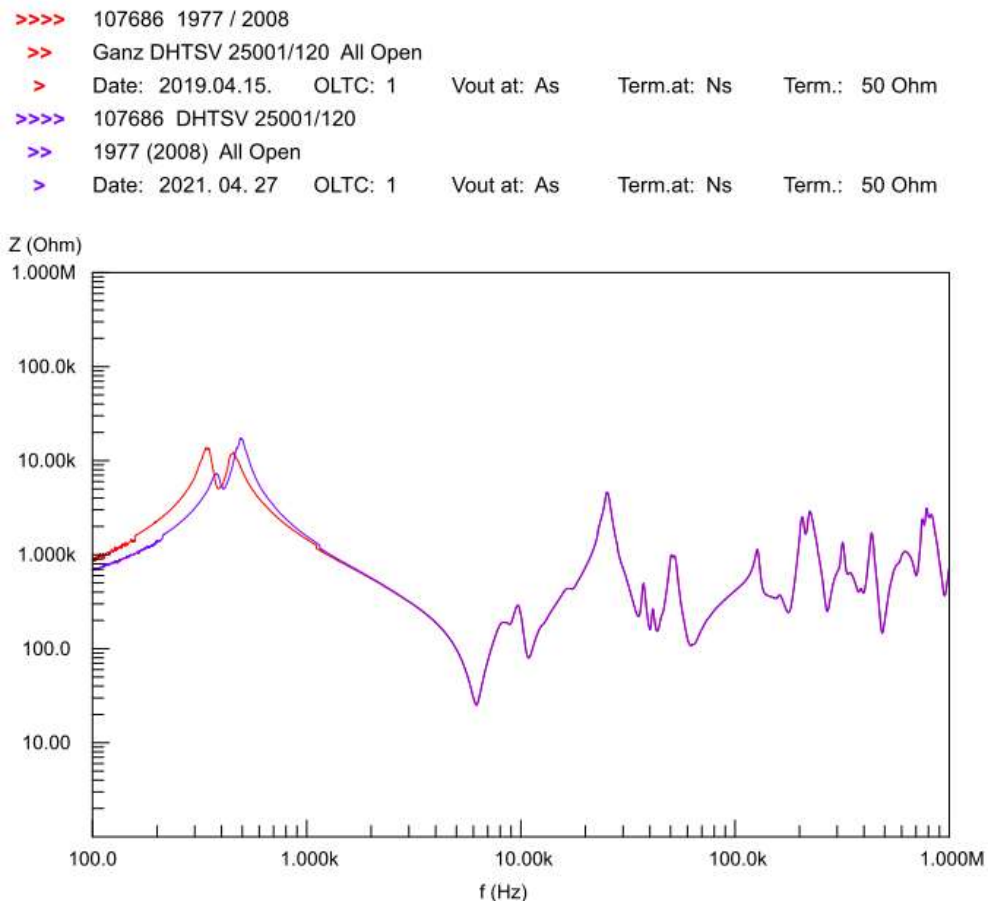
- Kiértékelés
 - A görbék összehasonlításából látható, hogy a 2021-es görbe alacsony frekvenciás tartományban jobbra el van tolódva a nagyobb frekvenciák felé, tehát ugyan azon impedancia értékeket nagyobb frekvenciaérték mellett vesz fel.
 - Az előző pontban említett jelenség a vasmagban megtalálható remanens fluxusok által létrehozott egyenáramú offset következménye lehet.
 - Közepes-, nagyobb-, illetve nagyfrekvenciás tartományokban a két görbe megegyező.

1U jelű primer fázistekercs kiértékelése:

- A fentebb bemutatott Ap_Np_00, Ap_Np_01 és Ap_Np_02 mérési jegyzőkönyvek kimutatják, hogy a transzformátor 1U jelű primer tekercsében geometriai elváltozás nem történt tehát mechanikailag megfelelő.

As_Ns_00:

- Elrendezés:
 - 2U jelű szekunder fázistekercs vizsgálata az 2U jelű szekunder tekercs átvezető szigetelőjén (**As**) és a szekunder oldali csillagpont kivezetésen (**Ns**) keresztül, nyitott primer kapcsok, és 1-es állású fokozatkapcsoló mellett.
- Vizsgálat eredménye:
 - A vizsgálat Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott jegyzőkönyve a 2.3.4-6. ábrán látható, piros színnel jelölve a 2019-es vizsgálat görbéje, kék színnel pedig a 2021-es vizsgálat görbéje.



2.3.4-6. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve As_Ns_00 mérési elrendezésben

- Kiértékelés
 - A görbék összehasonlításából látható, hogy a 2021-es görbe alacsony frekvenciás tartományban jobbra el van tolódva a nagyobb frekvenciák felé, tehát ugyan azon impedancia értékeket nagyobb frekvenciaérték mellett vesz fel.
 - Ezen jelenség a vasmagban megtalálható remanens fluxusok által létrehozott egyenáramú offset következménye lehet.
 - Közepes-, nagyobb-, illetve nagyfrekvenciás tartományokban a két görbe megegyező.

As_Ns_01:

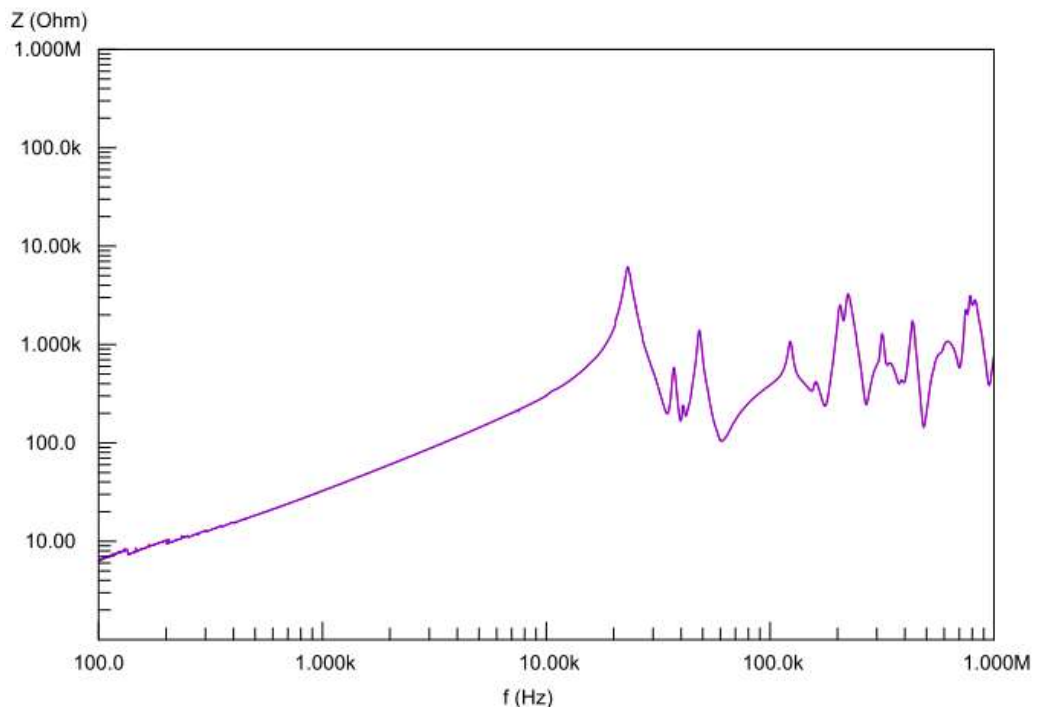
- Elrendezés:

- 2U jelű szekunder fázistekercs vizsgálata az 2U jelű szekunder tekercs átvezető szigetelőjén (**As**) és a szekunder oldali csillagpont kivezetésén (**Ns**) keresztül, rövidrezárt primer kapcsok, és 1-es állású fokozatkapcsoló mellett.
- Vizsgálat eredménye:
 - A vizsgálat Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott jegyzőkönyve a 2.3.4-7. ábrán látható, piros színnel jelölve a 2019-es vizsgálat görbéje, kék színnel pedig a 2021-es vizsgálat görbéje.

```

>>>> 107686 1977 / 2008
>> Ganz DHTSV 25001/120 Ap Bp Cp Np
> Date: 2019.04.15. OLTC: 1 Vout at: As Term.at: Ns Term.: 50 Ohm
>>>> 107686 DHTSV 25001/120
>> 1977 (2008) Ap Bp Cp Np
> Date: 2021. 04. 27 OLTC: 1 Vout at: As Term.at: Ns Term.: 50 Ohm

```



2.3.4-7. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve *As_Ns_01* mérési elrendezésben

- Kiértékelés
 - A görbék összehasonlításából látható, hogy a két görbe teljesen megegyezik.

2U jelű szekunder fázistekercs kiértékelése:

- A fentebb bemutatott *As_Ns_00* és *As_Ns_01* mérési jegyzőkönyvek kimutatják, hogy a transzformátor 2U jelű szekunder tekercsében geometriai elváltozás nem történt tehát mechanikailag megfelelő.

Bp_Np_00:

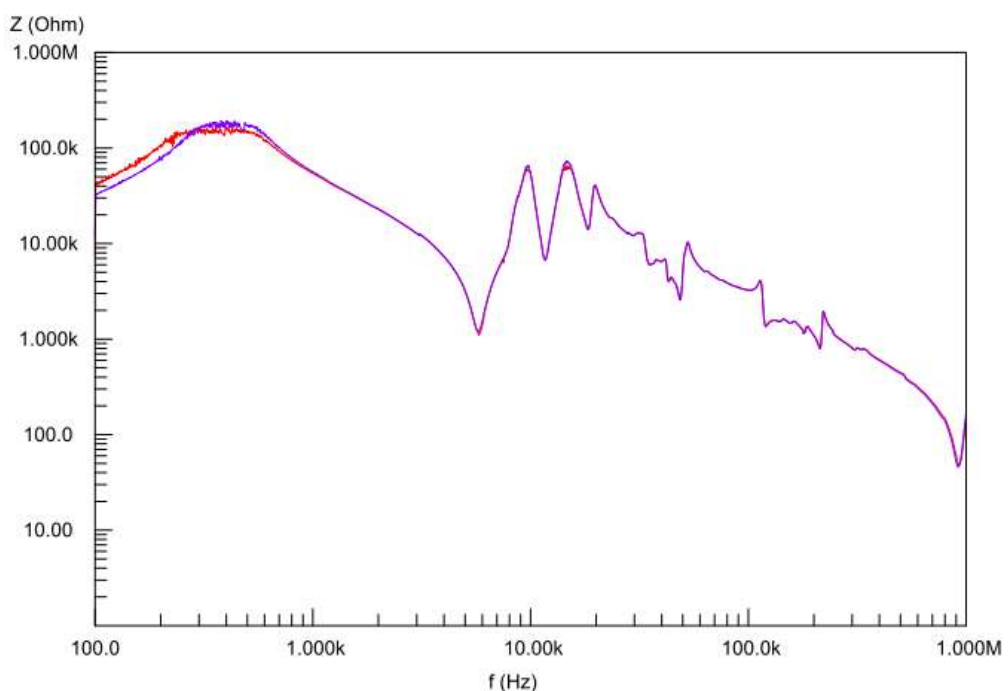
- Elrendezés:

- 1V jelű primer fázistekercs vizsgálata az 1V jelű tekercs átvezető szigetelőjén (**Bp**) és a primer oldali csillagpont kivezetésen (**Np**) keresztül, nyitott szekunder kapcsok, és 1-es állású fokozatkapcsoló mellett.
- Vizsgálat eredménye:
 - A vizsgálat Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott jegyzőkönyve a 2.3.4-8. ábrán látható, piros színnel jelölve a 2019-es vizsgálat görbéje, kék színnel pedig a 2021-es vizsgálat görbéje.

```

>>>> 107686 1977 / 2008
>> Ganz DHTSV 25001/120 All Open
> Date: 2019.04.15. OLTC: 1 Vout at: Bp Term.at: Np Term.: 50 Ohm
>>>> 107686 DHTSV 25001/120
>> 1977 (2008) All Open
> Date: 2021. 04. 27 OLTC: 1 Vout at: Bp Term.at: Np Term.: 50 Ohm

```



2.3.4-8. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Bp_Np_00 mérési elrendezésben

- Kiértékelés
 - A görbék összehasonlításából látható, hogy a 2021-es görbe alacsony frekvenciás tartományban jobbra el van tolódva a nagyobb frekvenciák felé, tehát ugyan azon impedancia értékeket nagyobb frekvenciaérték mellett vesz fel.
 - Az előző pontban említett jelenség a vasmagban megtalálható remanens fluxusok által létrehozott egyenáramú offset következménye lehet.
 - Közepes-, nagyobb-, illetve nagyfrekvenciás tartományokban a két görbe megegyező, az eltérés minimális.

Bp_Np_01:

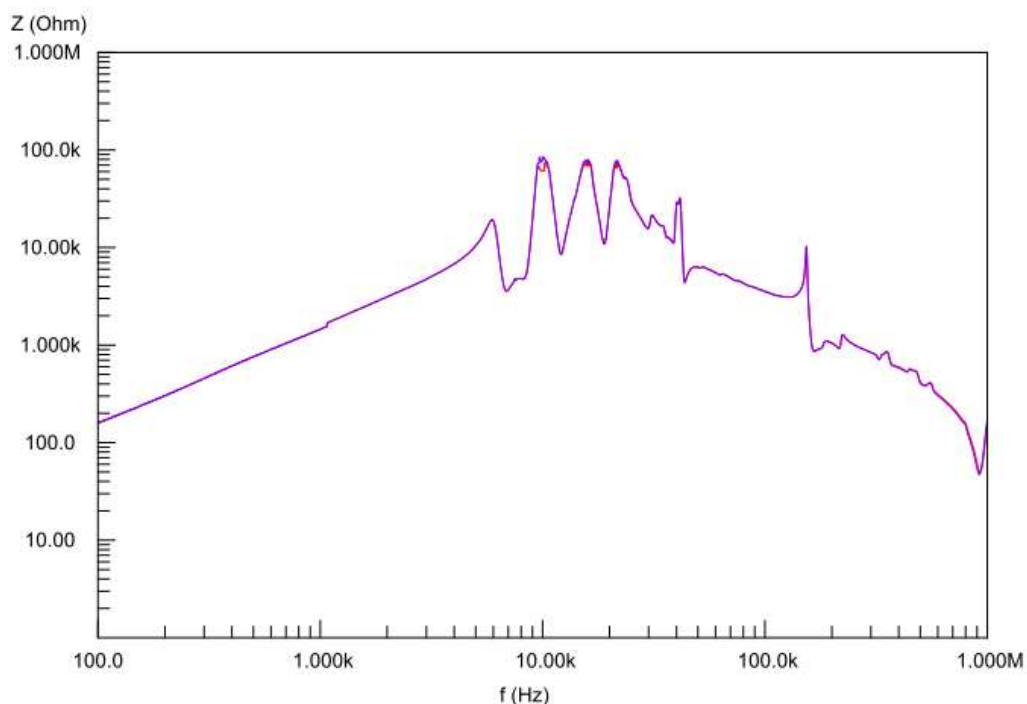
- Elrendezés:

- 1V jelű primer fázistekercs vizsgálata az 1V jelű tekercs átvezető szigetelőjén (**Bp**) és a primer oldali csillagpont kivezetésén (**Np**) keresztül, rövidrezárt szekunder kapcsok, és 1-es állású fokozatkapcsoló mellett.
- Vizsgálat eredménye:
 - A vizsgálat Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott jegyzőkönyve a 2.3.4-9. ábrán látható, piros színnel jelölve a 2019-es vizsgálat görbéje, kék színnel pedig a 2021-es vizsgálat görbéje.

```

>>>> 107686 1977 / 2008
>> Ganz DHTSV 25001/120 As Bs Cs Ns
> Date: 2019.04.15. OLTC: 1 Vout at: Bp Term.at: Np Term.: 50 Ohm
>>>> 107686 DHTSV 25001/120
>> 1977 (2008) As Bs Cs Ns
> Date: 2021. 04. 27 OLTC: 1 Vout at: Bp Term.at: Np Term.: 50 Ohm

```



2.3.4-9. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Bp_Np_01 mérési elrendezésben

- Kiértékelés
 - A görbék összehasonlításából látható, hogy a két görbe megegyezik, az eltérés elhanyagolható.

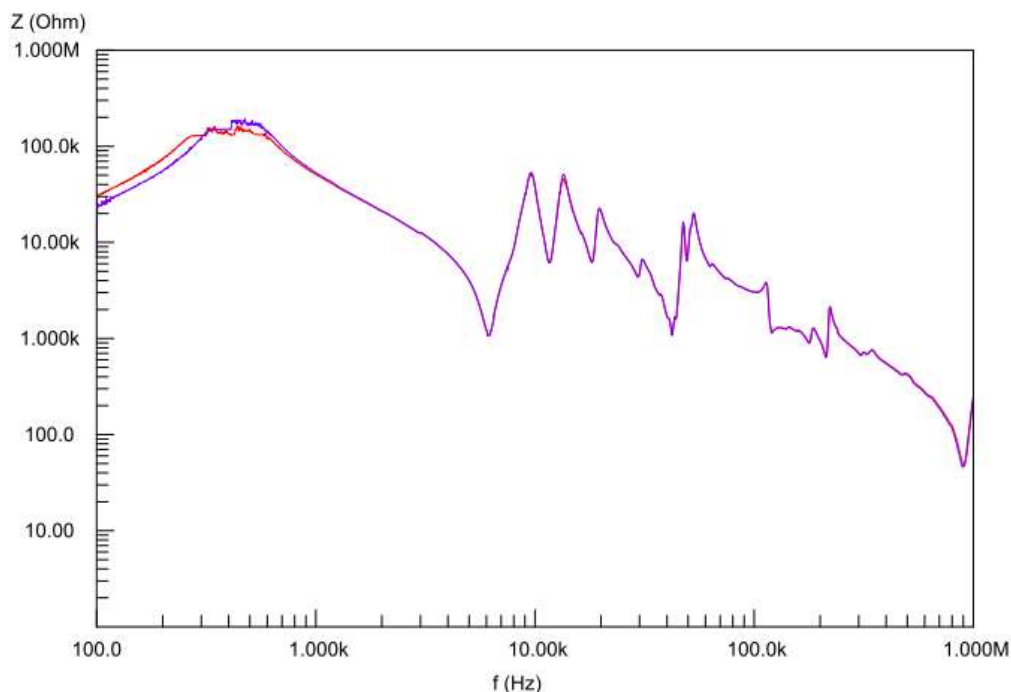
Bp_Np_02:

- Elrendezés:
 - 1V jelű primer fázistekercs vizsgálata az 1V jelű tekercs átvezető szigetelőjén (**Bp**) és a primer oldali csillagpont kivezetésén (**Np**) keresztül, nyitott szekunder kapcsok, és 14-es állású fokozatkapcsoló mellett.
- Vizsgálat eredménye:
 - A vizsgálat Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott jegyzőkönyve a 2.3.4-10. ábrán látható, piros színnel jelölve a 2019-es vizsgálat görbéje, kék színnel pedig a 2021-es vizsgálat görbéje.

```

>>>> 107686 1977 / 2008
>> Ganz DHTSV 25001/120 All Open
> Date: 2019.04.15. OLTC: 14 Vout at: Bp Term.at: Np Term.: 50 Ohm
>>>> 107686 DHTSV 25001/120
>> 1977 (2008) All Open
> Date: 2021. 04. 27 OLTC: 14 Vout at: Bp Term.at: Np Term.: 50 Ohm

```



2.3.4-10. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Bp_Np_02 mérési elrendezésben

- Kiértékelés
 - A görbék összehasonlításából látható, hogy a 2021-es görbe alacsony frekvenciás tartományban jobbra el van tolódva a nagyobb frekvenciák felé, tehát ugyan azon impedancia értékeket nagyobb frekvenciaérték mellett vesz fel.
 - Az előző pontban említett jelenség a vasmagban megtalálható remanens fluxusok által létrehozott egyenáramú offset következménye lehet.
 - Közepes-, nagyobb-, illetve nagyfrekvenciás tartományokban a két görbe megegyező, az eltérés minimális.

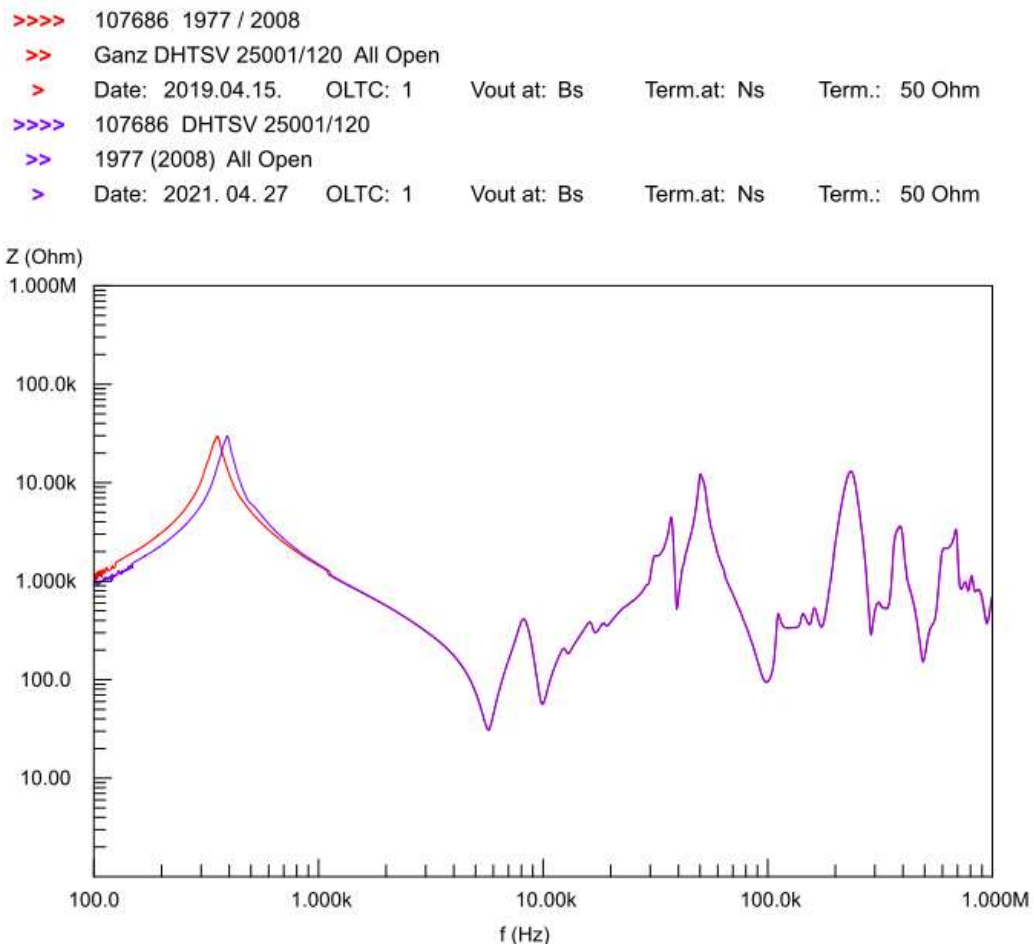
1V jelű primer fázistekercs kiértékelése:

- A fentebb bemutatott Bp_Np_00, Bp_Np_01 és Bp_Np_02 mérési jegyzőkönyvek kimutatják, hogy a transzformátor 1V jelű primer tekercsében geometriai elváltozás nem történt tehát mechanikailag megfelelő.

Bs_Ns_00:

- Elrendezés:
 - 2V jelű szekunder fázistekercs vizsgálata az 2V jelű tekercs átvezető szigetelőjén (**Bs**) és a szekunder oldali csillagpont kivezetésén (**Ns**) keresztül, nyitott primer kapcsok, és 1-es állású fokozatkapcsoló mellett.
- Vizsgálat eredménye:

- A vizsgálat Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott jegyzőkönyve a 2.3.4-11. ábrán látható, piros színnel jelölve a 2019-es vizsgálat görbéje, kék színnel pedig a 2021-es vizsgálat görbéje.



2.3.4-11. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Bs_Ns_00 mérési elrendezésben

- Kiértékelés
 - A görbék összehasonlításából látható, hogy a 2021-es görbe alacsony frekvenciás tartományban jobbra el van tolódva a nagyobb frekvenciák felé, tehát ugyan azon impedancia értékeket nagyobb frekvenciaérték mellett vesz fel.
 - Az előző pontban említett jelenség a vasmagban megtalálható remanens fluxusok által létrehozott egyenáramú offset következménye lehet.
 - Közepes-, nagyobb-, illetve nagyfrekvenciás tartományokban a két görbe megegyező, az eltérés minimális.

Bs_Ns_01:

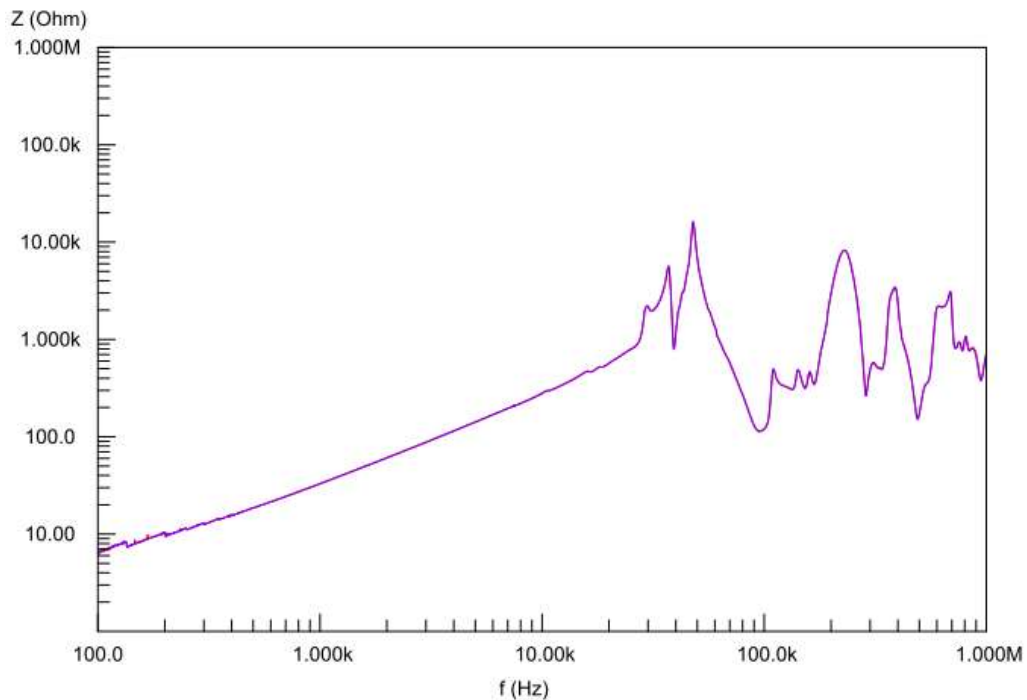
- Elrendezés:
 - 2V jelű szekunder fázistekercs vizsgálata az 2V jelű tekercs átvezető szigetelőjén (**Bs**) és a szekunder oldali csillagpont kivezetésen (**Ns**) keresztül, rövidrezárt primer kapcsok, és 1-es állású fokozatkapcsoló mellett.
- Vizsgálat eredménye:

- A vizsgálat Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott jegyzőkönyve a 2.3.4-3. ábrán látható, piros színnel jelölve a 2019-es vizsgálat görbéje, kék színnel pedig a 2021-es vizsgálat görbéje.

```

>>>> 107686 1977 / 2008
>> Ganz DHTSV 25001/120 Ap Bp Cp Np
> Date: 2019.04.15. OLTC: 1 Vout at: Bs Term.at: Ns Term.: 50 Ohm
>>>> 107686 DHTSV 25001/120
>> 1977 (2008) Ap Bp Cp Np
> Date: 2021. 04. 27 OLTC: 1 Vout at: Bs Term.at: Ns Term.: 50 Ohm

```



2.3.4-12. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Bs_Ns_01 mérési elrendezésben

- Kiértékelés
 - A görbék összehasonlításából látható, hogy a két görbe teljesen megegyezik.

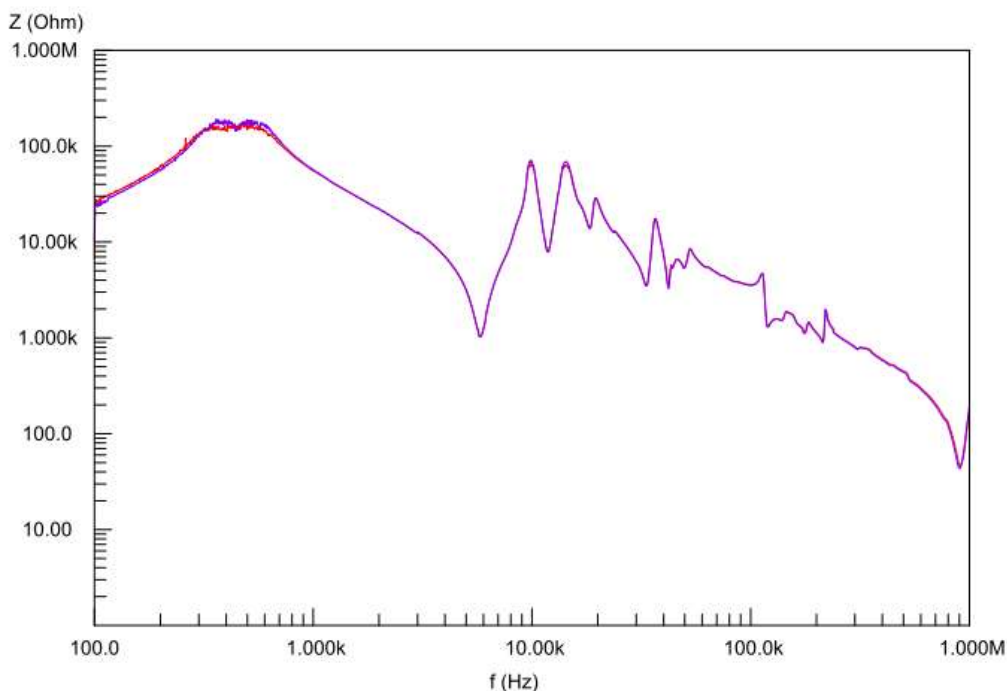
2V jelű szekunder fázistekercs kiértékelése:

- A fentebb bemutatott Bs_Ns_00 és Bs_Ns_01 mérési jegyzőkönyvek kimutatják, hogy a transzformátor 2V jelű szekunder tekercsében geometriai elváltozás nem történt tehát mechanikailag megfelelő.

Cp_Np_00:

- Elrendezés:
 - 1W jelű primer fázistekercs vizsgálata az 1W jelű tekercs átvezető szigetelőjén (**Cp**) és a primer oldali csillagpont kivezetésen (**Np**) keresztül, nyitott szekunder kapcsok, és 1-es állású fokozatkapcsoló mellett.
- Vizsgálat eredménye:
 - A vizsgálat Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott jegyzőkönyve a 2.3.4-13. ábrán látható, piros színnel jelölve a 2019-es vizsgálat görbéje, kék színnel pedig a 2021-es vizsgálat görbéje.

>>>> 107686 1977 / 2008
 >> Ganz DHTSV 25001/120 All Open
 > Date: 2019.04.15. OLTC: 1 Vout at: Cp Term.at: Np Term.: 50 Ohm
 >>>> 107686 DHTSV 25001/120
 >> 1977 (2008) All Open
 > Date: 2021. 04. 27 OLTC: 1 Vout at: Cp Term.at: Np Term.: 50 Ohm



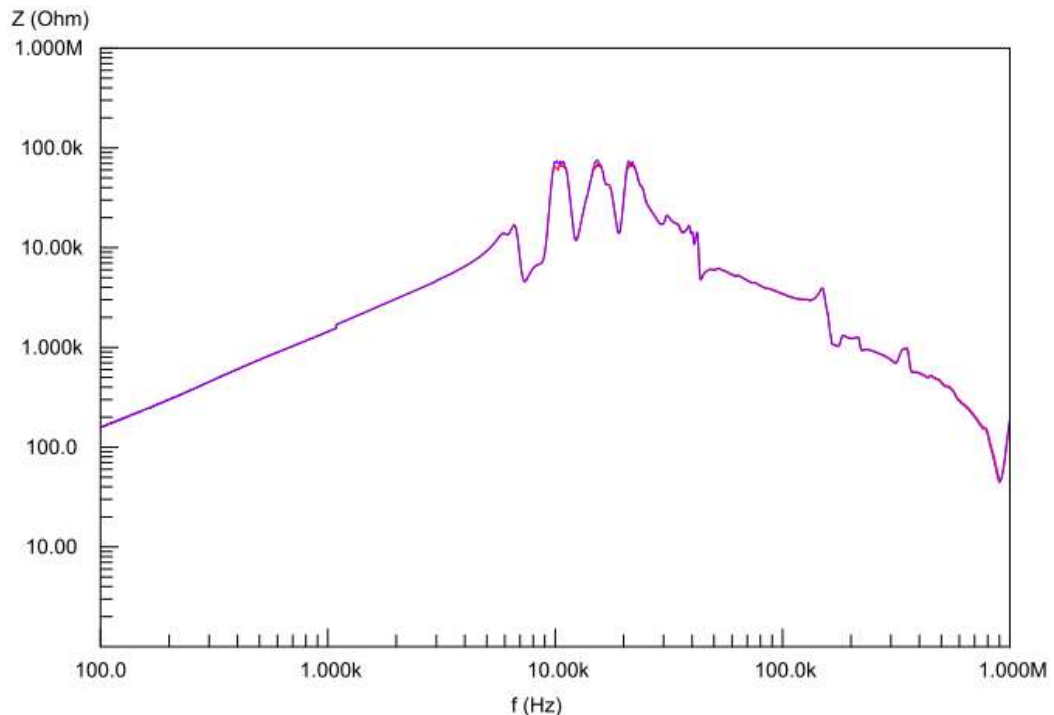
2.3.4-13. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Cp_Np_00 mérési elrendezésben

- Kiértékelés
 - A görbék összehasonlításából látható, hogy a 2021-es görbe alacsony frekvenciás tartományban jobbra el van tolódva a nagyobb frekvenciák felé, tehát ugyan azon impedancia értékeket nagyobb frekvenciaérték mellett vesz fel.
 - Az előző pontban említett jelenség a vasmagban megtalálható remanens fluxusok által létrehozott egyenáramú offset következménye lehet.
 - Közepes-, nagyobb-, illetve nagyfrekvenciás tartományokban a két görbe megegyező, az eltérés minimális.

Cp_Np_01:

- Elrendezés:
 - 1W jelű primer fázistekercs vizsgálata az 1W jelű tekercs átvezető szigetelőjén (**Cp**) és a primer oldali csillagpont kivezetésén (**Np**) keresztül, rövidrezárt szekunder kapcsok, és 1-es állású fokozatkapcsoló mellett.
- Vizsgálat eredménye:
 - A vizsgálat Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott jegyzőkönyve a 2.3.4-14. ábrán látható, piros színnel jelölve a 2019-es vizsgálat görbéje, kék színnel pedig a 2021-es vizsgálat görbéje.

>>>> 107686 1977 / 2008
 >> Ganz DHTSV 25001/120 As Bs Cs Ns
 > Date: 2019.04.15. OLTC: 1 Vout at: Cp Term.at: Np Term.: 50 Ohm
 >>>> 107686 DHTSV 25001/120
 >> 1977 (2008) As Bs Cs Ns
 > Date: 2021. 04. 27 OLTC: 1 Vout at: Cp Term.at: Np Term.: 50 Ohm



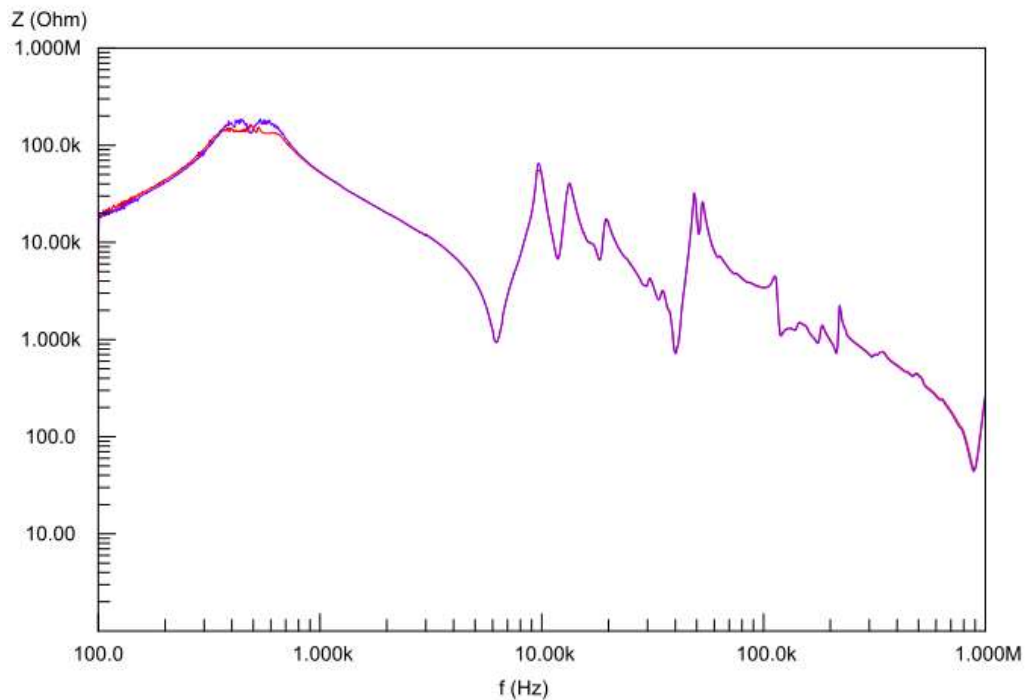
2.3.4-14. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Cp_Np_01 mérési elrendezésben

- Kiértékelés
 - A görbék összehasonlításából látható, hogy a két görbe megegyezik, az eltérés elhanyagolható.

Cp_Np_02:

- Elrendezés:
 - 1W jelű primer fázistekercs vizsgálata az 1W jelű tekercs átvezető szigetelőjén (**Cp**) és a primer oldali csillagpont kivezetésen (**Np**) keresztül, nyitott szekunder kapcsok, és 14-es állású fokozatkapcsoló mellett.
- Vizsgálat eredménye:
 - A vizsgálat Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott jegyzőkönyve a 2.3.4-15. ábrán látható, piros színnel jelölve a 2019-es vizsgálat görbéje, kék színnel pedig a 2021-es vizsgálat görbéje.

>>>> 107686 1977 / 2008
 >> Ganz DHTSV 25001/120 All Open
 > Date: 2019.04.15. OLTC: 14 Vout at: Cp Term.at: Np Term.: 50 Ohm
 >>>> 107686 DHTSV 25001/120
 >> 1977 (2008) All Open
 > Date: 2021. 04. 27 OLTC: 14 Vout at: Cp Term.at: Np Term.: 50 Ohm



2.3.4-15. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Cp_Np_02 mérési elrendezésben

- Kiértékelés
 - A görbék összehasonlításából látható, hogy a 2021-es görbe alacsony frekvenciás tartományban jobbra el van tolódva a nagyobb frekvenciák felé, tehát ugyan azon impedancia értékeket nagyobb frekvenciaérték mellett vesz fel.
 - Az előző pontban említett jelenség a vasmagban megtalálható remanens fluxusok által létrehozott egyenáramú offset következménye lehet.
 - Közepes-, nagyobb-, illetve nagyfrekvenciás tartományokban a két görbe megegyező, az eltérés minimális.

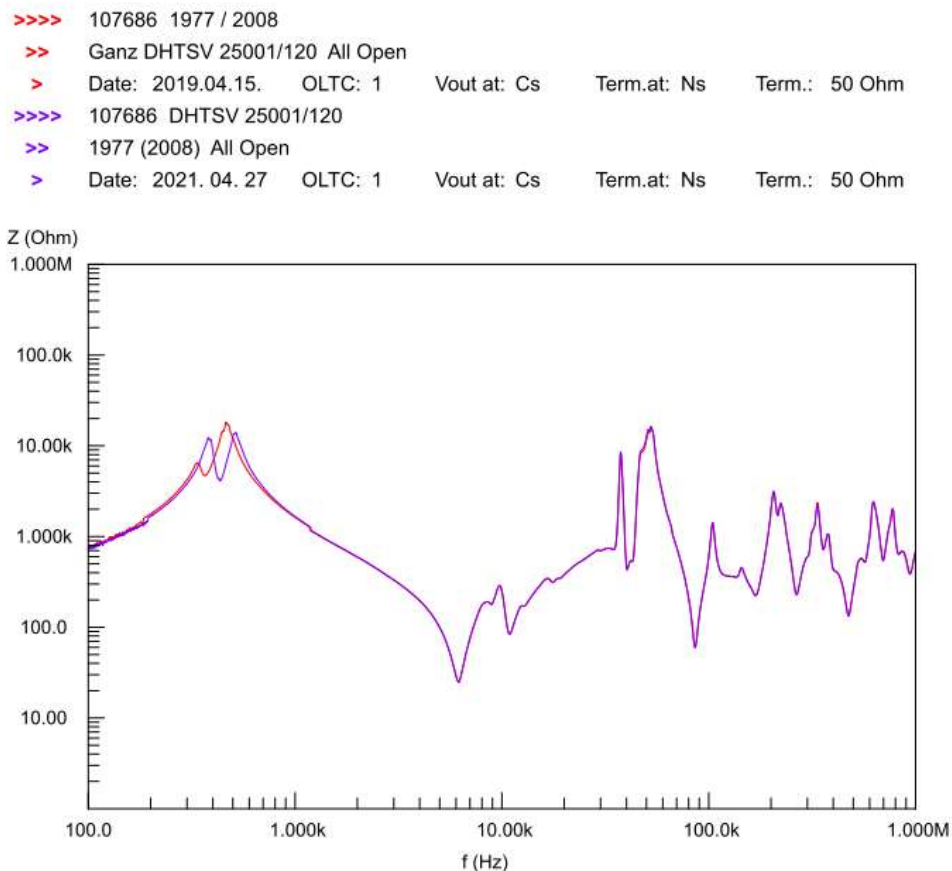
1W jelű primer fázistekercs kiértékelése:

- A fentebb bemutatott Cp_Np_00, Cp_Np_01 és Cp_Np_02 mérési jegyzőkönyvek kimutatják, hogy a transzformátor 1W jelű primer tekercsében geometriai elváltozás nem történt tehát mechanikailag megfelelő.

Cs_Ns_00:

- Elrendezés:
 - 2W jelű szekunder fázistekercs vizsgálata az 2W jelű tekercs átvezető szigetelőjén (Cs) és a szekunder oldali csillagpont kivezetésen (Ns) keresztül, nyitott primer kapcsok, és 1-es állású fokozatkapcsoló mellett.
- Vizsgálat eredménye:

- A vizsgálat Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott jegyzőkönyve a 2.3.4-16. ábrán látható, piros színnel jelölve a 2019-es vizsgálat görbéje, kék színnel pedig a 2021-es vizsgálat görbéje.



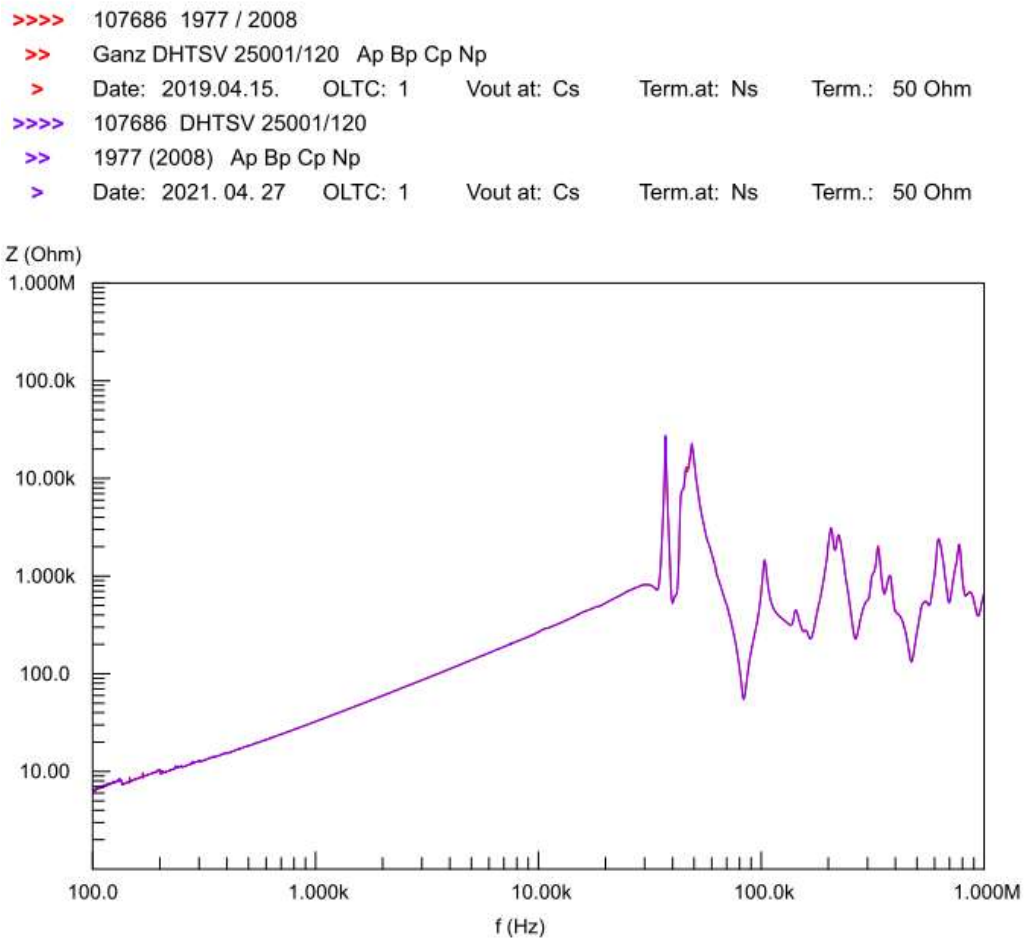
2.3.4-16. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Cs_Ns_00 mérési elrendezésben

- Kiértékelés
 - A görbék összehasonlításából látható, hogy a 2021-es görbe alacsony frekvenciás tartományban jobbra el van tolódva a nagyobb frekvenciák felé, tehát ugyan azon impedancia értékeket nagyobb frekvenciaérték mellett vesz fel.
 - Az előző pontban említett jelenség a vasmagban megtalálható remanens fluxusok által létrehozott egyenáramú offset következménye lehet.
 - Közepes-, nagyobb-, illetve nagyfrekvenciás tartományokban a két görbe megegyező, az eltérés minimális.

Cs_Ns_01:

- Elrendezés:
 - 2W jelű szekunder fázistekercs vizsgálata az 2W jelű tekercs átvezető szigetelőjén (Cs) és a szekunder oldali csillagpont kivezetésen (Ns) keresztül, rövidrezárt primer kapcsok, és 1-es állású fokozatkapcsoló mellett.
- Vizsgálat eredménye:

- A vizsgálat Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott jegyzőkönyve a 2.3.4-17. ábrán látható, piros színnel jelölve a 2019-es vizsgálat görbéje, kék színnel pedig a 2021-es vizsgálat görbéje.



2.3.4-17. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Cs_Ns_01 mérési elrendezésben

- Kiértékelés
 - A görbék összehasonlításából látható, hogy a két görbe teljesen megegyezik.

2W jelű szekunder fázistekercs kiértékelése:

- A fentebb bemutatott Cs_Ns_00 és Cs_Ns_01 mérési jegyzőkönyvek kimutatják, hogy a transzformátor 2W jelű szekunder tekercsében geometriai elváltozás nem történt tehát mechanikailag megfelelő.

A transzformátor mechanikai állapotának kiértékelése:

- A fent bemutatott transzformátoron vizsgált impedancia-frekvencia jelleggörbék fázisonkénti elemzéseit összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy a transzformátoron mechanikai deformáció nem történt, ez abból következik, hogy az egyes fázisok jelleggörbéinek eltérése a korábbi méréstől ugyan azon tulajdonságokat mutatnak, amelyek a vasmag remanens fluxusának következménye.

A következőkben bemutatom egy meghibásodott transzformátor impedancia-frekvencia jelleggörbéit, amelyet a transzformátor szétszerelését követően a meghibásodásról készült

képekkel támasztom alá. A szóban forgó gép egy DHBM 280000/400 típusú, 400/231/35 kV névleges feszültségű, 500/120 MVA névleges teljesítményű transzformátor.

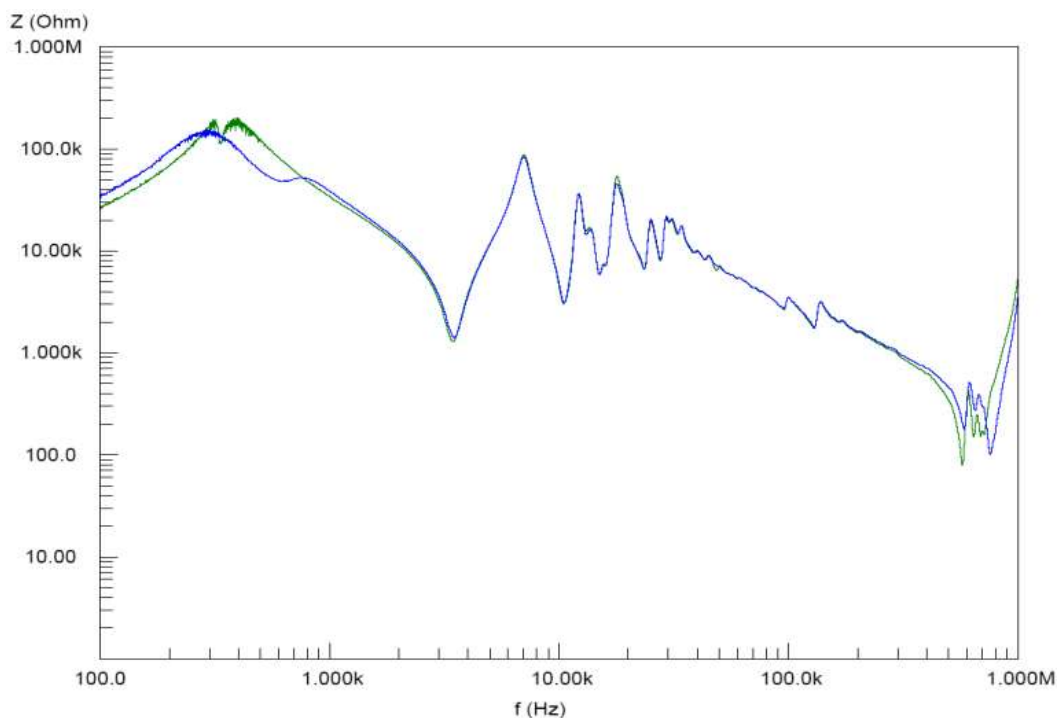
Esemény leírás:

- Az állomástól nem messze a 220 kV vonali feszültségű távvezeték L3 jelű fázisában villámcsapás következtében zárlat keletkezett, amely súlyosan megrongálta a transzformátort.
- A transzformátor Buchholz-reléje kikapcsoló jelzést adott a transzformátor minden feszültségű megszakítójára.
- A Buchholz-relében összegyűlt gázok vizsgálata kimutatta a nagy energiájú villamos ív következtében létrejött belső hibát.
- Ezen hiba hatására az impedancia-frekvencia jelleggörbékben is jelentős eltérések keletkeztek a korábbi mérési eredményekhez viszonyítva.

Fontos megjegyezni, hogy a fent említett transzformátor típusok takarékkapcsolású transzformátorok, tehát a 400 kV feszültségű nagyfeszültségű tekercselés 231 kV feszültségűnél meg van csapolva, így nem szükséges feleslegesen sok menetet készíteni, hátránya, hogy így a két feszültségű távvezeték-hálózat galvanikus összeköttetésben van. Ebből következik, hogy impedancia-frekvencia jelleggörbék vizsgálatánál felesleges a szekunder kapcsok mérése, ezért a 35 kV feszültségű tercier tekercselést érdemes vizsgálni.

1U jelű primer fázistekercs vizsgálata:

- Elrendezés, vizsgálat eredménye:
 - Az 2.3.4-18. ábrán a fent említett transzformátor 1U jelű primer oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéinek összehasonlítása látható nyitott tercier kivezetések mellett. A zárlat előtti vizsgálat során meghatározott görbe zöld színnel, míg a zárlat utáni vizsgálat során meghatározott görbe kék színnel van jelölve.



2.3.4-18. ábra DHBM 280000/400 típusú transzformátor 1U jelű primer oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéje [3]

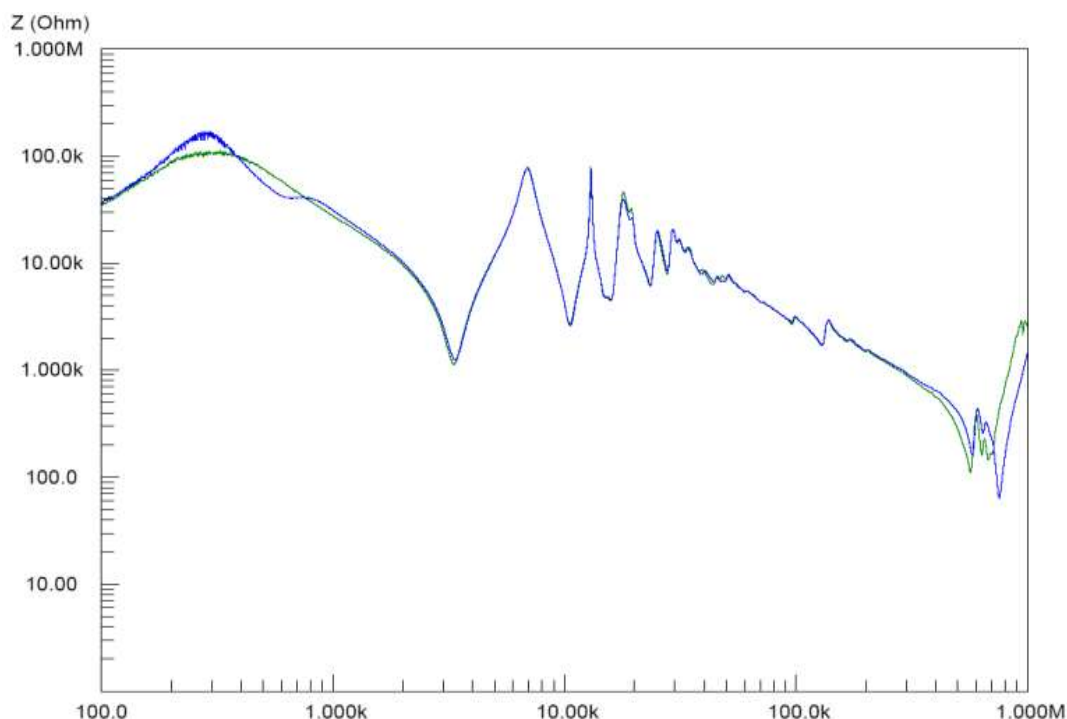
- Kiértékelés

- A görbe alacsonyfrekvenciás tartományában látható eltérés már hibásnak számít, ez abból eredeztethető, hogy a vasmag remanens fluxusa a zárlat következtében létrejött aszimmetrikus terhelése miatt jelentősen módosult, illetve látható, hogy a nagyobb frekvenciás tartományban – ahol a tekercselés soros-, és földkapacitása dominál – eltérés tapasztalható.
- Az utóbbi jelenség a tekercselés kapacitív elemeinek sérülésének, illetve a tekercselés sugár irányú elmozdulásának következménye lehet.

1V jelű primer fázistekercs vizsgálata:

- Elrendezés, vizsgálat eredménye:

- Az 2.3.4-19. ábrán a fent említett transzformátor 1V jelű primer oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéinek összehasonlítása látható nyitott tercier kivezetések mellett. A zárlat előtti vizsgálat során meghatározott görbe zöld színnel, míg a zárlat utáni vizsgálat során meghatározott görbe kék színnel van jelölve.



2.3.4-19. ábra DHBM 280000/400 típusú transzformátor 1V jelű primer oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéje [3]

- Kiértékelés

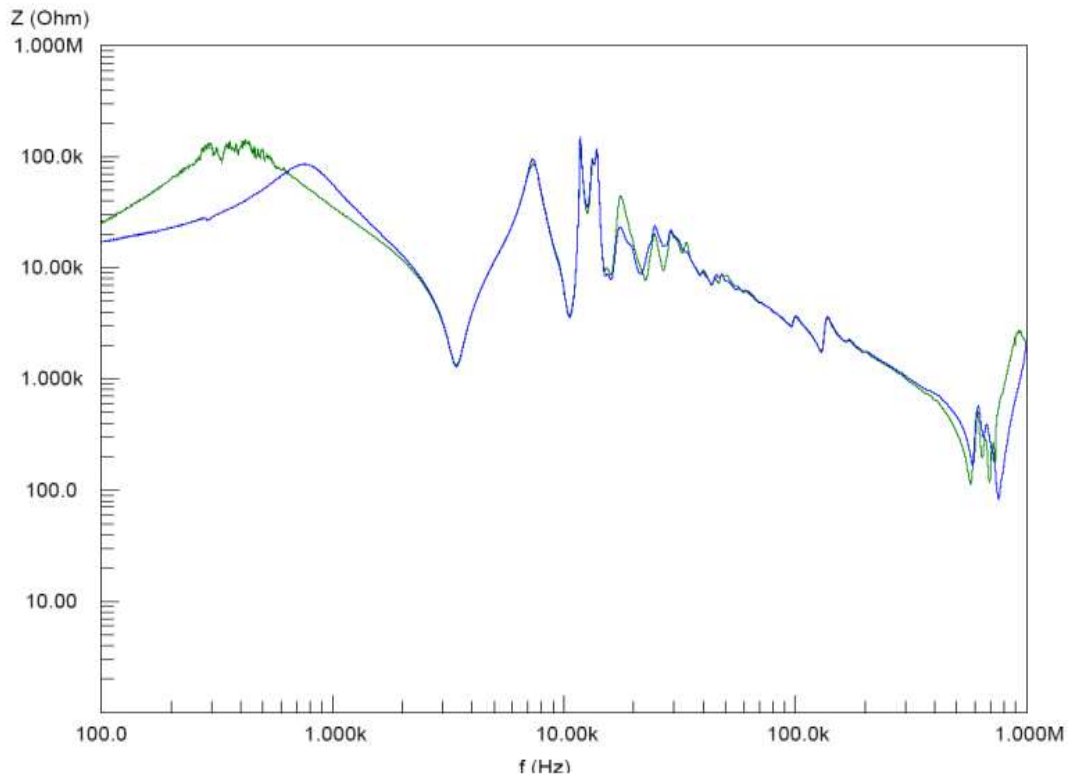
- A görbe elemzése során megállapítható, hogy a jelleggörbe az 1U jelű primer oldali fázistekercssel megegyező eltéréseket mutat, amelyeknek okai megegyezhetnek az 1U jelű fázistekercs elemzésénél ismertetetteknel.

1W jelű primer fázistekercs vizsgálata:

- Elrendezés, vizsgálat eredménye:

- Az 2.3.4-20. ábrán a fent említett transzformátor 1W jelű primer oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéinek összehasonlítása látható nyitott tercier kivezetések mellett. A

zárlat előtti vizsgálat során meghatározott görbe zöld színnel, míg a zárlat utáni vizsgálat során meghatározott görbe kék színnel van jelölve.



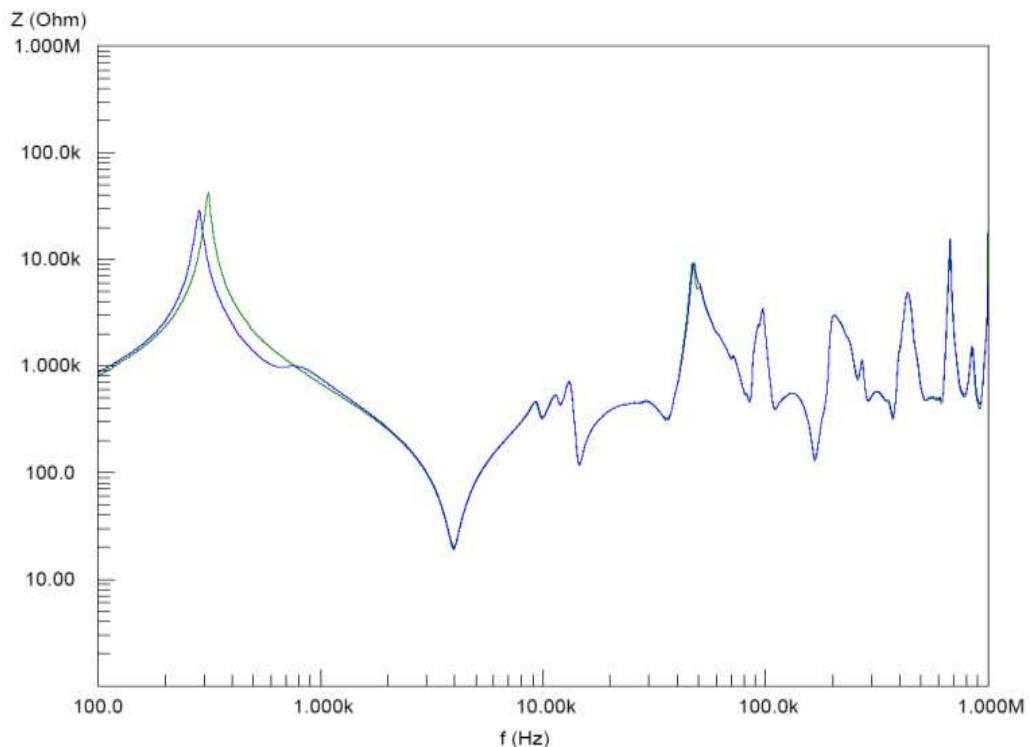
2.3.4-20. ábra DHBM 280000/400 típusú transzformátor 1W jelű primer oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéje [3]

- Kiértékelés
 - A görbe elemzése során megállapítható, hogy a jelleggörbe alacsonyfrekvenciás szakaszában jelentős eltérés tapasztalható a zárlat előtti és a zárlat utáni görbében, amely abból következik, hogy a zárlat a 1W jelű kivezetésre kapcsolt L3 jelű fázist érintette.
 - A vasmag remanens fluxusának hatása ezen fázistekercs jelleggörbéiben a legjelentősebb.
 - A fent elemzett 1U és 1V jelű primer oldali fázistekercs jelleggörbéihez hasonlóan a 1W jelű fázis primer oldali tekercs jelleggörbéjének nagyobb frekvenciás tartományában is tapasztalhatók eltérések, amelyek a kapacitív elemek sérülésének, illetve a tekercselés sugár irányú elmozdulásának következménye lehet.

3U jelű primer fázistekercs vizsgálata:

- Elrendezés, vizsgálat eredménye:
 - A fent említett transzformátor tercier oldali tekercselés delta kapcsolásának következtében az impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálatot az 3U jelű tercier tekercsen úgy végezzük, hogy az 3U és a 3V jelű kapcsokra kapcsoljuk a műszert.
 - Az 3U jelű tercier tekercs impedancia-frekvencia jelleggörbéje a 2.3.4-21. ábrán látható.
 - Az 3U jelű tercier oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéinek összehasonlítása látható nyitott primer oldali kivezetések mellett.

- A zárlat előtti vizsgálat során meghatározott görbe zöld színnel, míg a zárlat utáni vizsgálat során meghatározott görbe kék színnel van jelölve.

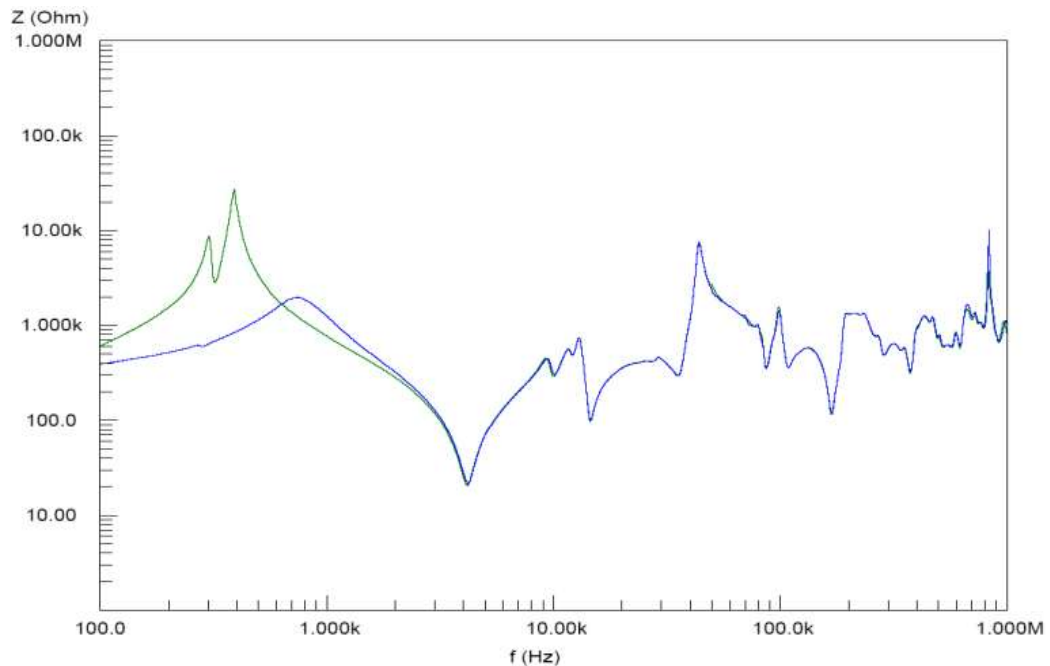


2.3.4-21. ábra DHBM 280000/400 típusú transzformátor 3U jelű terciér oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéje [3]

- Kiértékelés
 - A görbe alacsonyfrekvenciás tartományában látható eltérés a vasmag remanens fluxusa a zárlat következtében létrejött aszimmetrikus terhelésből eredeztethető.

3V jelű primer fázistekercs vizsgálata:

- Elrendezés, vizsgálat eredménye:
 - A gép terciér oldali tekercselés delta kapcsolásának következtében az impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálatot a 3V jelű terciér tekercsen úgy végezzük, hogy a 3V és a 3W jelű kapsokra kapcsoljuk a műszert.
 - A 3V jelű terciér tekercs impedancia-frekvencia jelleggörbéje a 2.3.4-22. ábrán látható.
 - A 3V jelű terciér oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéinek összehasonlítása látható nyitott primer oldali kivezetések mellett.
 - A zárlat előtti vizsgálat során meghatározott görbe zöld színnel, míg a zárlat utáni vizsgálat során meghatározott görbe kék színnel van jelölve.

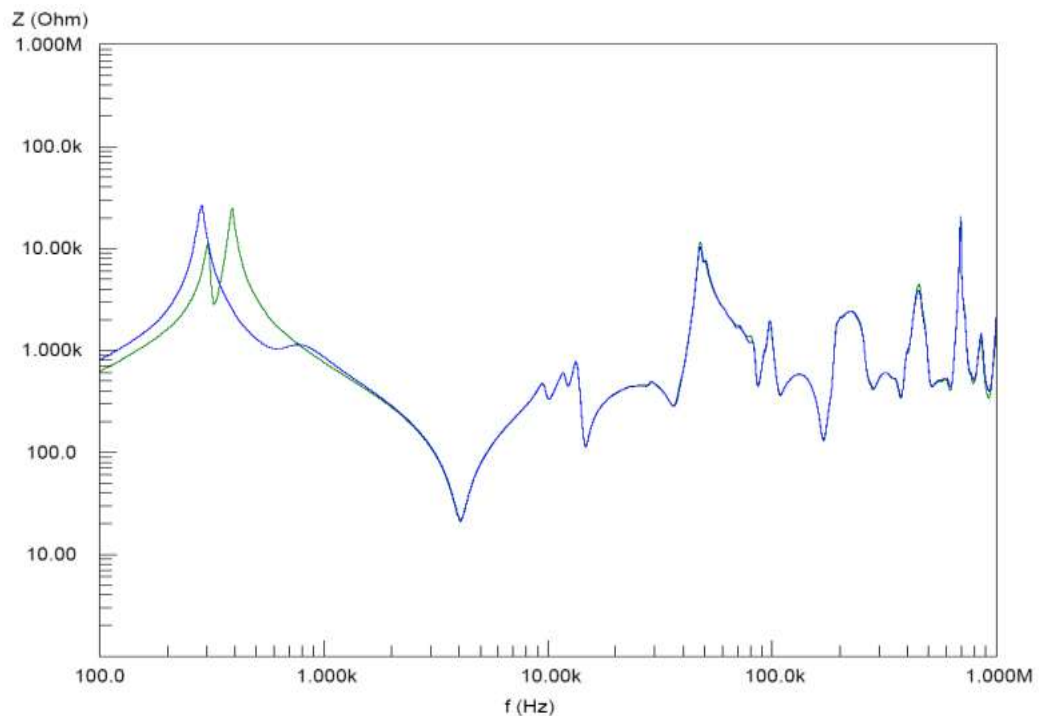


2.3.4-22. ábra DHBM 280000/400 típusú transzformátor 3V jelű tercier oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéje [3]

- Kiértékelés
 - A görbe alacsonyfrekvenciás tartományában látható nagyon jelentős eltérés a vasmag remanens fluxusa a zárlat következtében létrejött aszimmetrikus terhelésből eredeztethető.
 - Továbbá az alacsonyfrekvenciás rezonanciapontok nagyobb frekvenciaértékek felé tolódtak el, amely a tekercs kapacitás érték csökkenésének eredménye.

3W jelű primer fázistekercs vizsgálata:

- Elrendezés, vizsgálat eredménye:
 - A gép tercier oldali tekercselés delta kapcsolásának következtében az impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálatot az 3U és 3V jelű tekercsekkel azonos módon a 3W jelű tercier tekercsen is úgy végezzük, hogy a 3W és az 3U jelű kapcsokra csatlakoztatjuk a műszert.
 - Az 3V jelű tercier tekercs impedancia-frekvencia jelleggörbéje a 2.3.4-23. ábrán látható.
 - A 3W jelű tercier oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéinek összehasonlítása látható nyitott primer oldali kivezetések mellett.
 - A zárlat előtti vizsgálat során meghatározott görbe zöld színnel, míg a zárlat utáni vizsgálat során meghatározott görbe kék színnel van jelölve.



2.3.4-23. ábra DHBM 280000/400 típusú transzformátor 3W jelű tercier oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéje [3]

- Kiértékelés
 - A görbe alacsonyfrekvenciás tartományában látható nagyon jelentős eltérés a vasmag remanens fluxusa a zárlat következtében létrejött aszimmetrikus terheléséből eredeztethető.
 - Továbbá az alacsonyfrekvenciás rezonanciapontok ennél a tekercsnél a 1V jelűvel ellentétben a kisebb frekvenciaértékek felé tolódtak el, amely a tekercs kapacitás érték, illetve az induktivitás érték változás eredménye.

A transzformátor mechanikai állapotának kiértékelése:

- A 2.3.4-24. ábrán látható két képpel szemléltetem a fent bemutatott impedancia-frekvencia jelleggörbékhez tartozó transzformátor meghibásodott aktív részét, amelyben jól megfigyelhetők az impedancia-frekvencia jelleggörbék által kimutatott geometriai elváltozások.
- A felső képen látható, hogy a gép 1W jelű fázistekercse jelentősen megrongálódott a villámcsapás hatására.
- A nagy energiájú igénybevétel akkora mágneses kölcsönhatást gerjesztett, hogy a képen látható módon a tekercselés eldeformálódott, illetve ezen jelenség nagy energiájú íveléssel járt, amelynek káros hatása az alsó képen látható.
- A nagy energiájú ív hatására az olaj-papír szigetelés átütött és elégett, amelynek hatására gázok keletkeztek, amelyek a Buchholz-relében gyűltek össze.



2.3.4-24. ábra DHBM 280000/400 típusú transzformátor 1W jelű fázistekercsének geometriai meghibásodása [3]

A fent bemutatott példákból is látható, hogy az impedancia-frekvencia jelleggörbék felvétele alkalmas az aktív rész tekercselésének geometriai elváltozásának kimutatására, az időben elvégzett vizsgálatokkal megelőzhetők a későbbi meghibásodások és üzemzavarok.

2.3.5 Fejlesztési irányok, lehetőségek

Az impedancia-frekvencia jelleggörbék kiértékelése jelenleg szubjektív módon történik. Jelenlegis dolgoznak egy olyan fejlesztésen amelyben a kiértékelést egy algoritmus végzi nemzetközi szinten. Ez azt jelenti hogy a görbék elemzése eredményül egy számértéket ad, amelyet referenciaértékekhez viszonyítva objektív módon határozzuk meg a transzformátor mechanikai állapotát akár százalékban kifejezve. [2]

Egy úgynevezett Health Index bevezetése is kilátásba került amely megfogalmaz a transzformátorok élettartamának végére vonatkozó kritérium értéket, aminek jelentősége az hogy a transzformátorokon végzett állapotfelmérő vizsgálatokat, összegezve egy számértéket kapunk, amely megmutatja a transzformátor állapotát százalékban kifejezve, tehát nem szükséges az összes állapotfelmérő vizsgálat kiértékelése egyesével, hanem a matematikai algoritmus az összes vizsgálat mérési eredményéből egyetlen számértéket ad eredményül. Így ezen számérték segítségével teljes mértékben objektív módon előre megállapíthatjuk az esedékes javítások, eszközcserek időpontját, ezzel megkönnyítve az éves költségvetések tervezését, továbbá az üzemzavarok kockázatát is csökkenthetjük. Továbbá a Health Index segítségével a transzformátorokat rangsorolhatjuk is, hogy amelyik gép állapota kritikusabb. A Health Index a következő összefüggés segítségével adható meg: [8] [9]

$$HI = \frac{\sum_{j=1}^n (SF_j \cdot W_j)}{\sum_{j=1}^n 4 \cdot W_j}, \quad (17)$$

ahol SF_j jelöli az egyes állapotfelmérő vizsgálatok során meghatározott pontszámot, W_j pedig az egyes vizsgálatok súlyozását. A Health Index értéke egynél kisebb szám, ebből következik, hogy százalékban is kifejezhető. A jelenleg meghatározott Health Index nem tartalmazza az impedancia-frekvencia jelleggörbék mechanikai állapotára vonatkozó kimutatását, de ha az impedancia-frekvencia jelleggörbéket is egy számértékkel akár százalék értékben fejeznék ki, akkor a Health Index a transzformátorok mechanikai állapotát is figyelembe tudná venni. [8] [9]

Kutatások folynak a Health Index kiértékelésére mesterséges intelligencia segítségével is. Továbbá a Health Index csökkenésének mértékét is kutatják. A Health Index csökkenés vizsgálatának segítségével hatékonyabban tervezhetővé válnak a karbantartások, és az üzemzavarok kockázata is számítható lehet. Meglepő tény, egyes kutatások kimutatják, hogy az újabb gyártású transzformátorok Health Index csökkenésének mértéke sokkal nagyobb mint a korábban gyártott gépeké, ebből következik, hogy az új eszközök drasztikus minőségcsökkenése a transzformátoroknál is fennáll. [8] [9]

Továbbá kutatások folynak a nagyobb-, illetve kisebb feszültségű tekercselés csillag és delta kapcsolása közötti impedancia-frekvencia jelleggörbéinek különbségének, és a magtípusú, illetve köpenytípusú vasmaggal rendelkező gépek impedancia-frekvencia jelleggörbéi közötti különbségek feltárására, és ezek számértékben való kifejezésére is. [8] [9]

3 Összefoglalás

Dolgozatomban foglalkoztam a villamosenergia-rendszer és a villamosenergia-átvitel szerves, illetve nélkülözhetetlen eleméről a transzformátorok mechanikai elváltozásainak vizsgálatával. Az impedancia frekvencia jelleggörbék vizsgálata üzemi, állapotellenőrző vizsgálatok közül a tekercselés és a vasmag mechanikai állapotát határozza meg villamos mérési elvek alapján a transzformátor szétszerelése nélkül.

A transzformátorok meghibásodásának jelentős része zárlatok következtében történik, amely az aktív rész mechanikai állapotát rontja, mivel a zárlatok nagy energiájú mágneses erő kölcsönhatásokat hoznak létre az aktív részben. Mechanikai meghibásodás következtében roncsolódik a szigetelés is, ebből következik, hogy dielektromos problémák lépnek fel, tehát a zárlatbiztonság veszélyes mértékben csökken. Az impedancia-frekvencia jelleggörbék felvétele után a görbék kiértékelésével komplex képet kapunk az aktív rész mechanikai állapotáról, elváltozásairól, a hiba fajtája és helye a görbékből meghatározható. Ezen hibák kimutatásával, illetve megfelelő időben elvégzett javítással csökkenthető a meghibásodások, és üzemzavarok kockázata, továbbá a rendszeres állapotfelmérések segítségével tervezhetőek a javítások is, így a kockázat drasztikusan csökken.

Az impedancia-frekvencia jelleggörbék vizsgálata kiforrott állapotfelmérő mérés, de mint minden más tudományterületben megtalálható mérés technikai módszer, ez is tovább, és tovább fejlődik. Fejlődés határát csak a szükségesség – hogy van-e értelme tovább fejleszteni – és a mérés technika fejlődése határozza meg. A számítástechnika fejlődésével az impedancia-frekvencia jelleggörbék kiértékelése is fejlődik. Így egy összehasonlításra alapuló szubjektív vizsgálatból egy számértékben kifejezhető eredménnyel rendelkező mérést kapunk, amely segítségével a transzformátorok mechanikai állapotát objektíven tudjuk értékelni, ebből következik, hogy mérési hibák csökkennek, a mérési eredmény pedig pontosabb, kiszámíthatóbb, és alkalmazhatóbb lesz karbantartások időpontjának meghatározásában. Az informatika rohamos fejlődése hatással van a mérés technikára, így ezen vizsgálati módszer a jövőben sokkal nagyobb szerepet kaphat a transzformátorok állapotellenőrzésében.

Köszönet nyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni konzulenseimnek Dr. Kvasznicza Zoltán Villamos Hálózatok Tanszék vezetőjének, illetve Kovács János E.ON Alállomási Osztály Primer berendezések és vállalkozás szakterületvezetőnek a rengeteg munkát és segítséget a dolgozat elkészítésében. Továbbá szeretném megköszönni Maza Gábor E.ON Mérnök iroda operatív irányító és Hegyi Tamás E.ON Duális képzési területi referensnek a segítséget és a kapcsolati tőkét. Szeretném külön megköszönni az E.ON Alállomási Osztály Primer diagnosztikai csoport dolgozóinak Lovász Lázár Leventének és a csoportvezetőjének Bán Krisztiánnak a rengeteg segítséget, amely színvonalasabbá tette a dolgozatot.

Irodalomjegyzék

- [1] Ö. Luspay, Közép- és nagyfeszültségű hálózati berendezések diagnosztikai vizsgálata, Budapest: Magyar Áramszolgáltatók Egyesülete, 2000.
- [2] G. Csépes, Szerző, *(S)FRA Sweep Frequency Response Analysis, Régi és új CIGRE munkabizottságok tevékenységei*. [Performance]. B&C Diagnostics, 2015.
- [3] G. Csépes, Szerző, *Üzemi tapasztalatok FRA méréssel*. [Performance]. MAVIR Zrt., 2010.
- [4] Wikipédia, „Tekercs (áramkörü alkatrész),” [Online]. Available: [https://hu.wikipedia.org/wiki/Tekercs_\(%C3%A1ramk%C3%B6ri_alkatr%C3%A9sz\)](https://hu.wikipedia.org/wiki/Tekercs_(%C3%A1ramk%C3%B6ri_alkatr%C3%A9sz)).
- [5] Wikipédia, „Kondenzátor (áramkörü alkatrész),” Wikipédia, [Online]. Available: [https://hu.wikipedia.org/wiki/Kondenz%C3%A1tor_\(%C3%A1ramk%C3%B6ri_alkatr%C3%A9sz\)](https://hu.wikipedia.org/wiki/Kondenz%C3%A1tor_(%C3%A1ramk%C3%B6ri_alkatr%C3%A9sz)).
- [6] Traftek, *Traftek 4.2 verzió Műszaki leírás és kezelési leírás*, Budapest: B&C Diagnostics, 2017.
- [7] L. L. Lovász, Szerző, *(S)FRA mérések*. [Performance]. E.ON Dél-dunántúli Áramhálózati Zrt., 2021.
- [8] A. N. Jahromi, R. Piercy, S. Cress, J. R. R. Service és W. Fan, „An Approach to Power Transformer Asset Management Using Health Index,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2009.
- [9] W. R. Tamma, R. A. Prasajo és H. Suwarno, „High voltage power transformer condition assessment considering the health index value and its decreasing rate,” *349789131_High_voltage_power_transformer_condition_assessment_considering_the_health_index_value_and_its_decreasing_rate*.

Ábrajegyzék

2.3.1-1. ábra Transzformátor tekercselésének mechanikai elváltozásának szemléltetése [2]	6
2.3.1-2. ábra Mágneses erőhatások következtében deformálódott tekercs [3]	7
2.3.1-1. ábra Induktivitásra kapcsolt egyenfeszültség hatására az induktivitáson kialakuló feszültség és áram tranziens időfüggvénye. 9	
2.3.1-2. ábra Induktivitáson eső feszültség, és a rajta átfolyó áram fázor ábrája, és időfüggvénye váltakozó feszültségű táplálás esetén10	
2.3.1-3. ábra Induktivitásra kapcsolt váltakozó feszültség hatására az induktivitáson kialakuló áram-idő és feszültség-idő függvény két különböző frekvenciaértékre ábrázolva.....	11
2.3.1-4. ábra Kapacitásra kapcsolt egyenfeszültség hatására a kapacitáson kialakuló feszültség és áram tranziens időfüggvénye	12
2.3.1-5. ábra Kapacitáson eső feszültség, és a rajta átfolyó áram fázor ábrája, és időfüggvénye váltakozó feszültségű táplálás esetén. 13	
2.3.1-6. ábra Kapacitásra kapcsolt váltakozó feszültség hatására az kapacitáson kialakuló áram-idő és feszültség-idő függvény két különböző frekvenciaértékre ábrázolva.....	14
2.3.1-7. ábra Ellenálláson eső feszültség, és a rajta átfolyó áram fázor ábrája, és időfüggvénye váltakozó feszültségű táplálás esetén. 15	
2.3.1-8. ábra Soros kapcsolású RLC kör kapcsolási rajza, feszültség, és impedancia fázor ábrája	16
2.3.1-9. ábra RLC kör egyes elemeinek induktív reaktancia- frekvencia, kapacitív reaktancia-frekvencia, és ellenállás-frekvencia jelleggörbéje	16
2.3.1-10. ábra RLC kör impedancia-frekvencia jelleggörbéje	17
2.3.1-11. ábra RLC kör Bode-diagramja.....	18
2.3.2-1. ábra Impedancia-frekvencia karakterisztika felvételére alkalmas mérő kapcsolás elvi kapcsolási vázlata [1].....	19
2.3.2-2. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbe felvételére alkalmazott B&C Diagnostics Traftek 4.2.27 műszer [7]	20
2.3.2-3. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbe felvétele logaritmusos frekvencia, illetve ohmban meghatározott impedancia tengellyel	21

2.3.2-4. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbék felvétele lineáris frekvencia, illetve ohmban meghatározott impedancia tengellyel	22
2.3.2-5. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbe felvétele logaritmikus frekvencia, illetve decibelben meghatározott amplitúdó tengellyel	22
2.3.2-6. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbe fázismenete felül logaritmikus, alul lineáris frekvencia tengelyt alkalmazva	22
2.3.2-7. ábra Traftek 4.2.27 műszer előlapjának rajza	23
2.3.2-8. ábra Traftek 4v2 szoftver felhasználói felülete	24
2.3.2-9. ábra Yd11 kapcsolási csoportú transzformátorok vizsgálatára ajánlott mérési elrendezések [7]	25
2.3.3-1. ábra Transzformátor impedancia-frekvencia jelleggörbéje [1]	26
2.3.3-2. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbék felosztás a frekvenciák szempontjából [2]	27
2.3.3-3. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbe eltolódása a vasmag remanens fluxusának hatására	28
2.3.3-4. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbe eltolódása az olajnélküli állapot hatására [2]	29
2.3.3-5. ábra Impedancia frekvencia jelleggörbék eltolódása a vasmag földelése megszűnésének hatására [2]	30
2.3.3-6. ábra Impedancia frekvencia jelleggörbék eltolódása a tank földelése megszűnésének hatására [2]	31
2.3.3-7. ábra Impedancia frekvencia jelleggörbék eltolódása a fokozatkapcsoló álláshelyzetének függvényében	31
2.3.3-8. ábra Impedancia frekvencia jelleggörbék eltolódása a mérési feszültség változtatásának függvényében [2]	32
2.3.3-9. ábra Impedancia frekvencia jelleggörbék eltolódása a mérési irány függvényében [2]	32
2.3.4-1. ábra Impedancia-frekvencia jelleggörbe változásai geometriai elváltozások hatására [2]	33
2.3.4-2. ábra Kisebb feszültségű és nagyobb feszültségű tekercselés közötti tengelyirányú geometriai elváltozás hatására megváltozó átvitt kimenő áram (a, ábra) és átvitt feszültség (b, ábra) impedancia-frekvencia jelleggörbéje [2]	34
2.3.4-3. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Ap_Np_00 mérési elrendezésben	35
2.3.4-4. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Ap_Np_01 mérési elrendezésben	36
2.3.4-5. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Ap_Np_02 mérési elrendezésben	37
2.3.4-6. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve As_Ns_00 mérési elrendezésben	38
2.3.4-7. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve As_Ns_01 mérési elrendezésben	39
2.3.4-8. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Bp_Np_00 mérési elrendezésben	40
2.3.4-9. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Bp_Np_01 mérési elrendezésben	41
2.3.4-10. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Bp_Np_02 mérési elrendezésben	42
2.3.4-11. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Bs_Ns_00 mérési elrendezésben	43
2.3.4-12. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Bs_Ns_01 mérési elrendezésben	44
2.3.4-13. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Cp_Np_00 mérési elrendezésben	45
2.3.4-14. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Cp_Np_01 mérési elrendezésben	46
2.3.4-15. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Cp_Np_02 mérési elrendezésben	47
2.3.4-16. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Cs_Ns_00 mérési elrendezésben	48
2.3.4-17. ábra Traftek 4v2 szoftver által kinyomtatott impedancia-frekvencia jelleggörbe vizsgálat jegyzőkönyve Cs_Ns_01 mérési elrendezésben	49
2.3.4-18. ábra DHBM 280000/400 típusú transzformátor 1W jelű primer oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéje [3]	50
2.3.4-19. ábra DHBM 280000/400 típusú transzformátor 1V jelű primer oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéje [3]	51
2.3.4-20. ábra DHBM 280000/400 típusú transzformátor 1W jelű primer oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéje [3]	52
2.3.4-21. ábra DHBM 280000/400 típusú transzformátor 3U jelű tercier oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéje [3]	53
2.3.4-22. ábra DHBM 280000/400 típusú transzformátor 3V jelű tercier oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéje [3]	54
2.3.4-23. ábra DHBM 280000/400 típusú transzformátor 3W jelű tercier oldali fázistekercsének zárlat előtti, illetve zárlat utáni impedancia-frekvencia jelleggörbéje [3]	55
2.3.4-24. ábra DHBM 280000/400 típusú transzformátor 1W jelű fázistekercsének geometriai meghibásodása [3]	56