

Szórási veszteség frekvenciafüggésének (FRSL=Frequency Response of Stray Losses) alkalmazhatósága az olaj-papír szigetelésű transzformátorok diagnosztikájában

Csépes Gusztáv, *Diagnostics Kft.*

gcsepes@diagnostics.hu

XX. Szigeteléstechnikai Konferencia, Sümeg, 2022. május 4-6.

Tartalomjegyzék

- 1. Az FRSL technika szerepe, fontossága**
- 2. Röviden a szórási veszteségről és a CTC tekercskonstrukciókról**
- 3. Röviden az FRSL mérés technikáról**
- 4. FRSL diagnosztika, FRSL esettanulmányok**
- 5. Konklúziók**

A tekercsek **elmozdulása nagy veszélyt** jelent a trafók üzemére, ill. egész élettartamára. **Számos módszer létezik, amely a tekercs geometriai deformációját, ill. elmozdulását** diagnosztizálni tudja: impedancia változás mérése, **LVI** (Low Voltage Impulse) teszt, **FRA** (Frequency Response Analysis), és az **FRSL (Frequency Response of Stray Losses)**.

Az FRSL, a **szórási veszteség frekvenciafüggése** viszonylag **ritkán használt**, speciális és **hiánypótló módszer** az olaj-papíros szigetelésű trafók diagnosztikájában.

Az FRSL **módszer főleg kiegészítő vizsgálatként használható**, amikor a hibagázaanalízis (**HGA**) diagnosztika során „**túlmelegedés, ív**” hibaeredmény adódik, mert **ilyenkor az FRSL teszt a melegedés hibajelenség megerősítésére, ill. beazonosítására használható.**

Az a tapasztalat, hogy a HGA „túlmelegedés, ív” hibajelzése esetén **más hagyományos mérések még normál állapotot jeleznek**, amikor az **FRSL hasznos jelzést ad**, vagyis beazonosítható a tekercshiba.

Hasznosan alkalmazható az **FRSL** olyan trafóknál is, ahol jelentős a zárlati igénybevétel, amikor a trafó tekercsben **megnövekszik a szórási fluxussal kapcsolódó örvényáram**, ill. a **CTC típusú vezeték** szálai között lép fel **rövidzár**.

A **HGA és az FRSL együttes használata** lehetőség ad időben történő intézkedésre, **nehogy zárlat léphessen fel a trafóban**.

Az FRSL technika megértése és a mérési eredmények hatékony kiértékelése céljából érdemes áttekinteni az alábbi főbb tématerületeket:

- Trafó mágneses körök, szórt tér
- Szórási reaktancia
- Örvényáram (eddy-current) kialakulása
- Örvényáram csökkentése a tekercsekben
- CTC (Continuously Transposed Conductor (Cable))

Transzformátor mágneses kör alapvetések

Transzformátor mágneses kör alapvetések

Napjainkban, minden trafó konstrukciónál az egyik legfontosabb szempont a **hatásfok és az élettartam növelése**.

A trafó élettartamát a **papírosszigetelés** élettartama határozza meg, az élettartam **hatékony diagnosztikával** és időben elvégzett karbantartással biztosítható.

A **hatásfok az összveszteségtől függ**, amelybe beletartozik az **örvényáram okozta veszteség is**.

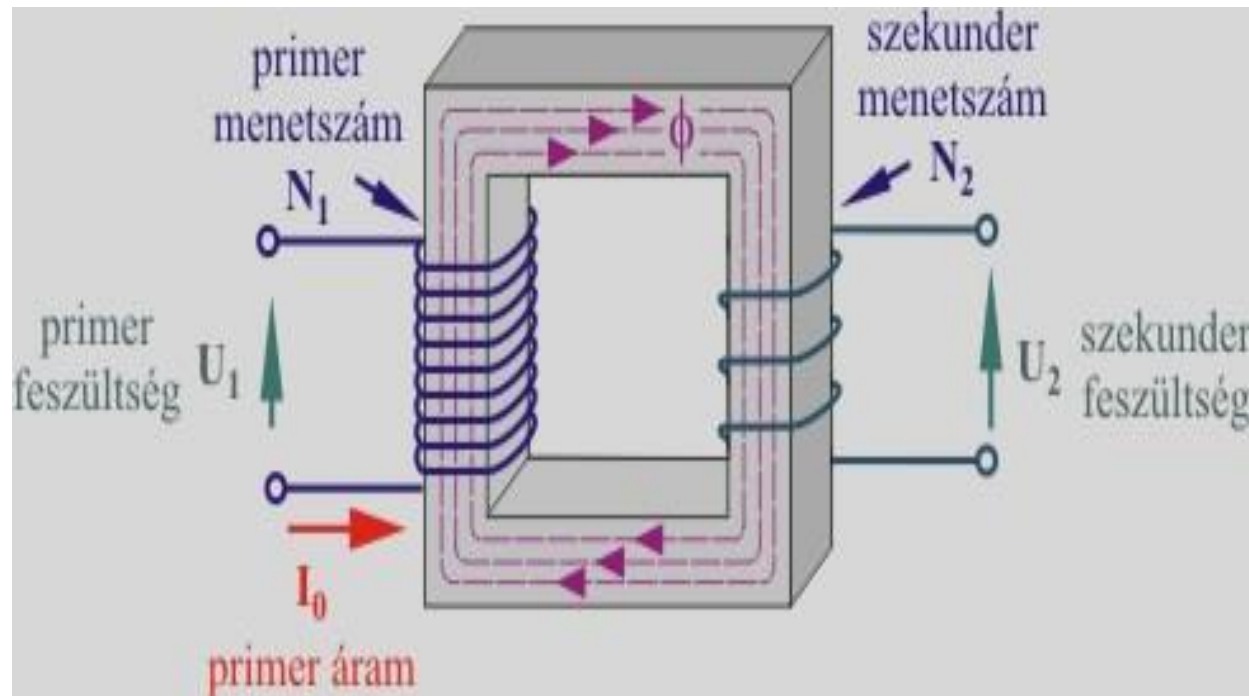
Akkor alkalmazható **hatékonyan az FRSL** technika, amikor a trafó tekercsben **nő a szórási fluxussal kapcsolódó örvényáram**.

A trafók működése a **zárt vasmag (magyar szabadalom) és a rajta elhelyezett tekercsek elektromágneses kapcsolatán alapszik** és a **kölcsönös nyugalmi indukció elvén működik**. Elvi felépítését tekintve két, vagy több, egymással **szoros mágneses csatolásban lévő – közös, zárt vasmagon elhelyezett – tekercsből** áll. Az energiát felvevő tekercset primer, az energiát leadót szekunder tekercsnek nevezzük.

Ha egy vezetón keresztüli áram folyik, akkor a **vezető körül mágneses teret hoz létre.**

Időben változó mágneses fluxust metsző vezetőben feszültség indukálódik.

Ha a primer tekercset szinuszosan változó U_1 feszültségre kapcsoljuk, akkor a tekercsben áram indul, ez mágneses fluxust létesít, amely a vasmagban, és a szekunder tekercsen keresztül záródik. A változó fluxus a szekunder tekercsben U_2 feszültséget indukál, a primer tekercsben pedig önindukciót okoz. Így mindkét oldal feszültségét a közös fluxus által indukáltként írhatjuk fel, feszültségek aránya az áttétel.



A valós trafó eltér az ideálistól: a valóságban az összefüggések nem teljesen lineárisok, veszteségek lépnek fel, üresjárás, terhelés és rövidzárás esetén a tekercsek menetei más és más fluxussal kapcsolódnak stb.

Azaz, szórt terek jönnek létre, ezért fontos az FRSL technika tárgyalásához áttekinteni ezt a témát.

- **Főmező:** Trafó mágneses terének azon része, amely kapcsolódik mind a primer, mind a szekunder tekercssel. A Főmező biztosítja az átalakítást.
- **Szórt tér:** *Transzformátor mágneses terének azon része, amely **vagy csak a primer, vagy csak a szekunder tekercssel kapcsolódik, nem vesz részt az energiaátalakításban.***
- **Mágneses kör:** Azon térrészek, amelyeken keresztül a transzformátor mágneses tere záródik: főbb elemei az oszlopok, illetve a járom, valamint a szórási tér. A mágneses kör elemeinek ismeretében a primer és szekunder áramok segítségével a transzformátor fluxusai számíthatók.
- **Helyettesítő kapcsolás:** A transzformátor villamos jellemzőinek számításához használható áramkör, amelyben koncentrált paraméterű elemeket szokás figyelembe venni.
- **Tekercsellállások:** a primer és szekunder (kis- és nagyfeszültségű) tekercsek ohmos ellenállásai.
- **Szórási reaktancia:** *a primer, illetve szekunder tekercsek **szórási fluxusát leképező inuktivitásokkal számított reaktanciák.***
- **Főmező reaktancia:** mindkét tekercssel kapcsolódó főmező. A főmező reaktancia jelentősen függ a trafó vasmagjának telítési állapotától.

Vasveszteség: vasmagban keletkezik, a mágneses hiszterézis és az örvényáramok következtében keletkező hőmennyiséget adja. A trafólemezek ferromágnes anyagok, igénye: legyen **kicsi a hiszterézis és örvényáram okozta veszteség, szigetelt lemezelés, nagy fajlagos ellenállás örvényáramok csökkentése céljából.**

Az örvényáramú veszteségek az indukció és a lemezvastagság négyzetével változnak.

Vasveszteségi ellenállás: Fiktív ellenállás, amelyen keletkező wattos veszteség megegyezik a vasveszteséggel. A **vasveszteség a terheléstől függetlenül állandó.**

Tekercselési veszteség: trafó tekercseiben keletkező veszteség, vezeték ellenállásán keletkező hőmennyiséget adja. A **terhelt trafón tekercs- vagy rézveszteségnek nevezik.**

Tekercsveszteség a mindenkori terheléstől függ.

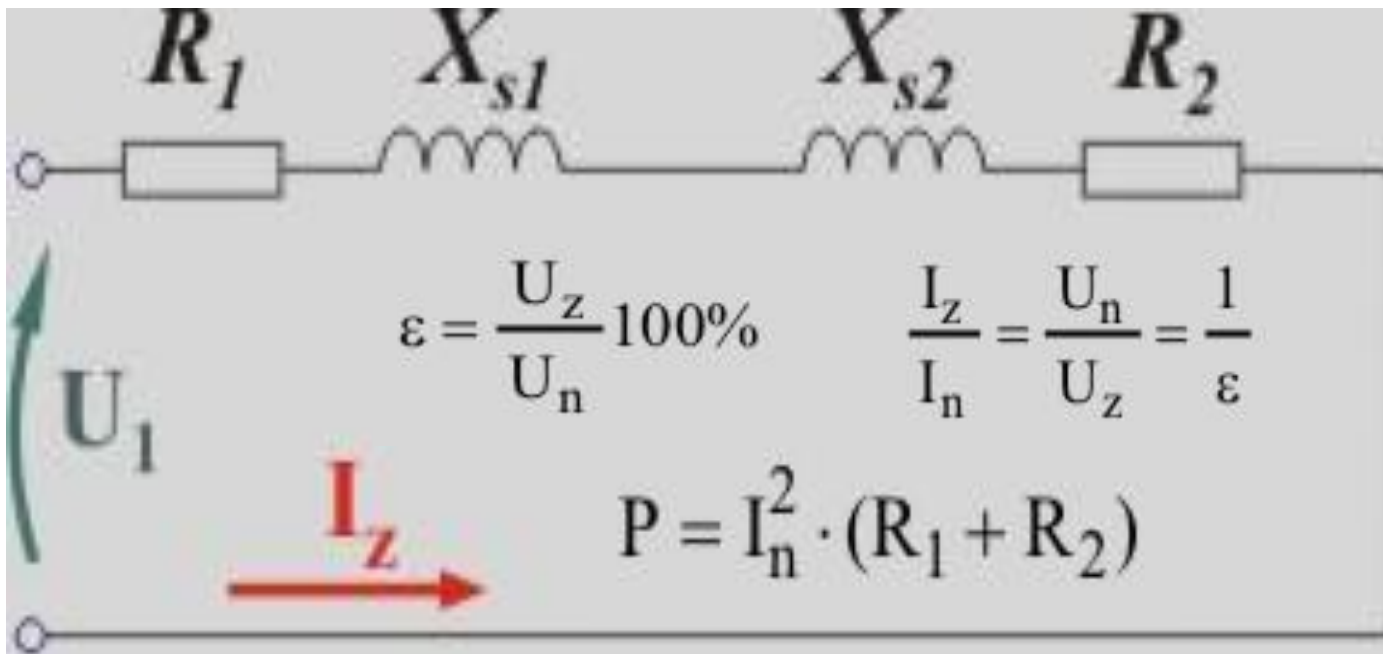
Veszteség csökkentése: párhuzamos szálak, örvényáram veszteség kisebb, de ilyenkor lehet kiegyenlítő áram (többletveszteség), cserélgetik a szálakat.

Tekercsveszteség függ frekvenciától is, mivel a behatolási mélység befolyásolja a vezetésben résztvevő **huzalkeresztmetszetet.** A NF és KF **tekercsek közötti távolság a rövidzárási impedancia,** ill. az egész trafó fő paramétere.

Rövidzárási állapot: A trafó szekunder oldalát rövidre zárjuk, a szekunder kapocsfeszültség értéke nulla, az oszlopon nem lesz fluxus, a szórt fluxus a jármon záródik. **Rövidzárási**

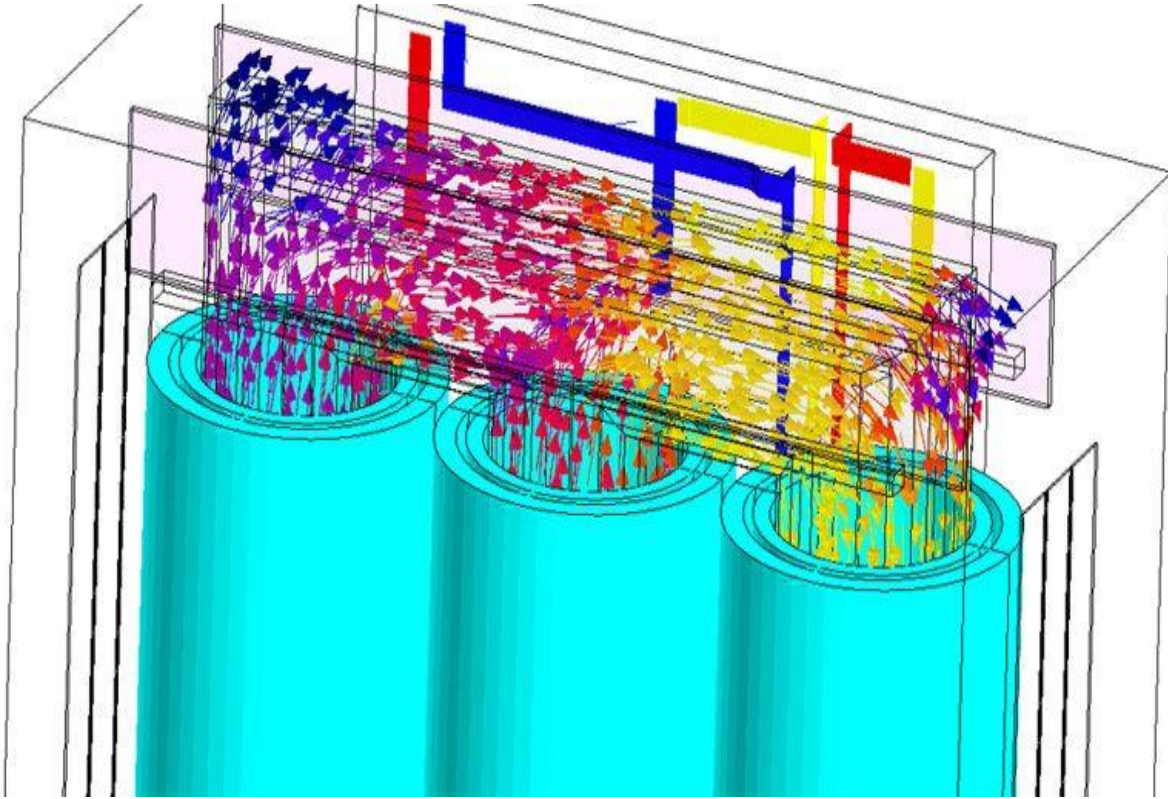
feszültség: Rövidzárási állapotban a primer oldalon a névleges áramhoz tartozó feszültség.

Szekunder rövidrezárásakor primeren teljesítmény közelítéssel **a primer és a szekunder tekercsveszteség összegével egyenlő**. Rövidrezáráskor a szekunder feszültség nagyon kicsi, elhanyagolható a trafó indukált feszültsége is, tehát négyzetesen kicsi a vasveszteség az üzemihez képest. **Százalékos rövidzárási feszültség neve: drop.**

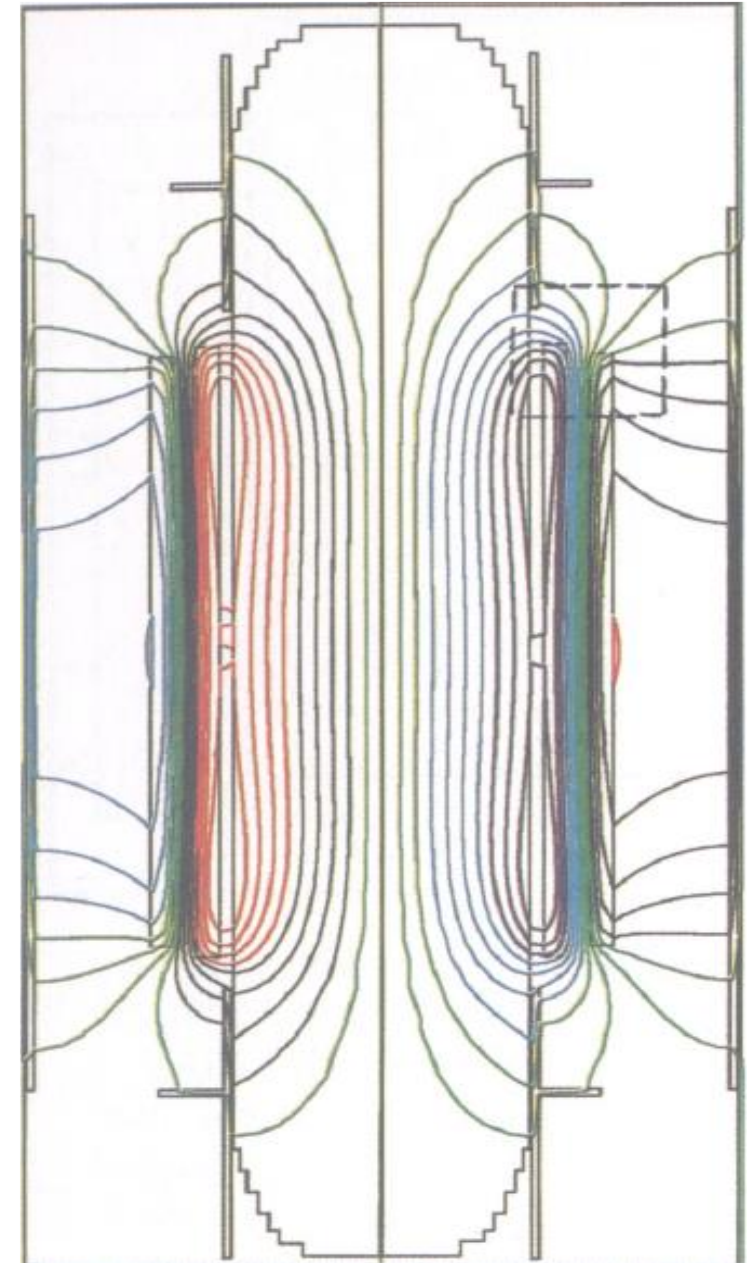


A rövidzárási mérés során a **kisebb feszültségű oldalt célszerű rövidre zárn**i, és a nagyobb feszültségű oldalon mérni, így a feszültség is mérhetőbb és az áram sem lesz túl nagy. Rövidzárási mérés során meghatározható még a helyettesítő ábrákon szereplő **szórási reaktanciák összege is**.

Háromfázisú trafó ideális fluxuselozzlása



A valóságban a fluxus vonalak nem ideálisan haladnak a vasmagban és a tekercsekben sem, azaz **nem minden fluxusvonal kapcsolódik mindkét tekercessel, szivárgási (Leakage), vagy más néven szórási erővonalak lépnek fel.**



Szórt fluxus örvényáram, szkinhatás

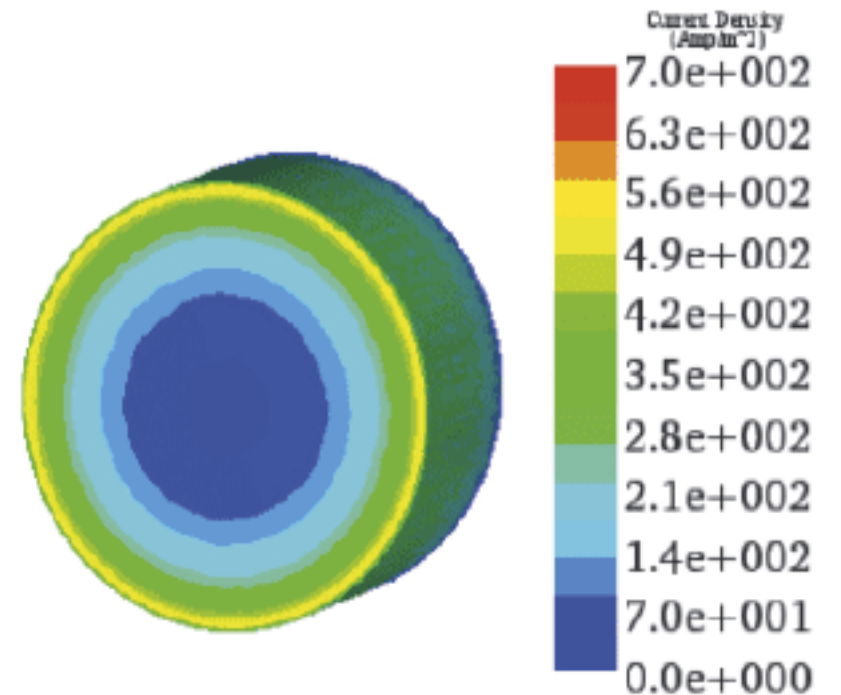
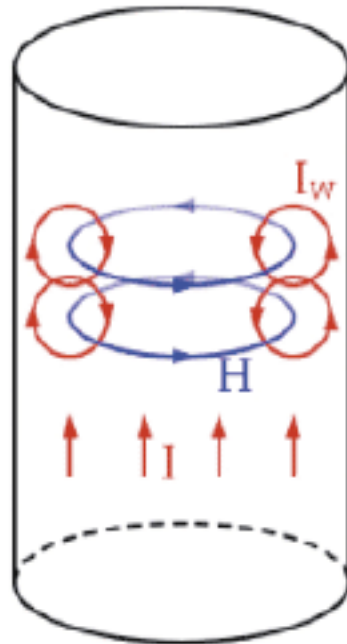
CTC (Continuously Transposed Conductor (cable))

Szórt fluxus örvényáramokat gerjeszt a vezetőben is, itt is keletkezik örvényáramú veszteség. Különösen igaz ez, amikor a primer tekercset gerjesztjük és a szekunder tekercset rövidre zárjuk.

AC áram sűrűség alakulása a vezetőben

Tekercs vezetékben **un. skin hatás lép** fel már 50Hz-es feszültség esetén is. **A vezetőben áram indukálódik, van H mágneses tere, ez az áramot a felület felé szorítja, így az áramot vezető keresztmetszet lecsökken.**

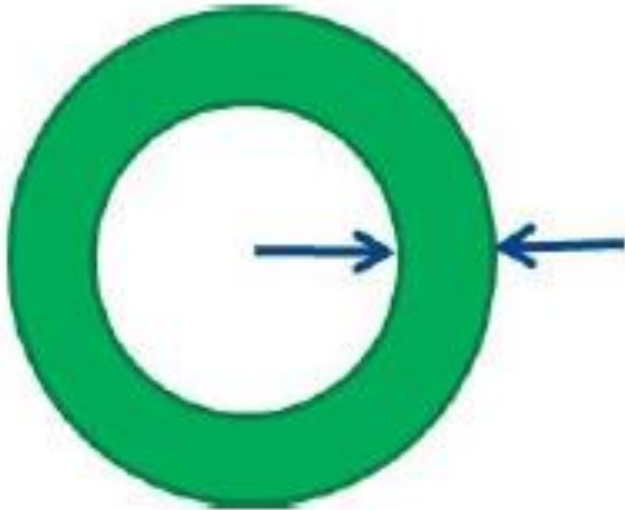
Az **egyenáramú ellenálláshoz képest** az 50Hz-es ellenállás **jelentősen megváltozik** (megnő), belső részeken szinte **nem is folyik áram** (lásd a jobb oldali ábrát)



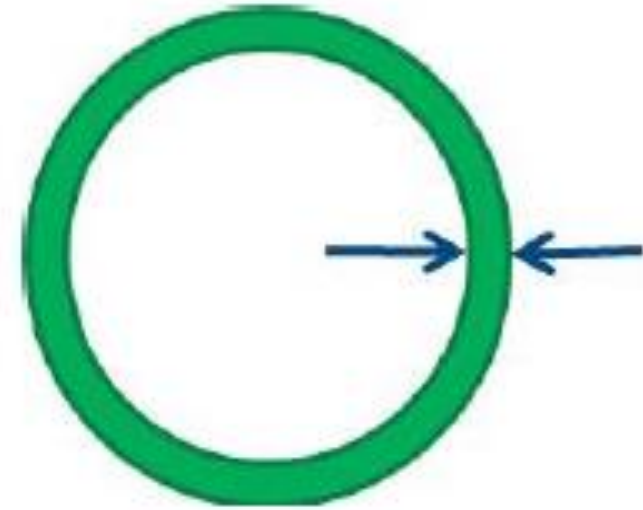
Az örvényáram veszteséget a szórási fluxus okozza, frekvencia függő, szkin hatás következménye, a trafóknál ezt szórás veszteségnek nevezik.

Ahogy a frekvencia növekszik pl. **50Hz-től 400 Hz-ig**, a szkin hatás annál jelentősebb, az áram egyre közelebb folyik a vezető felülethez (**kiszorul**), csökkentve a szkin mélységet.

Ezáltal a vezető hasznos keresztmetszete egyre csökken, az AC jellegű ellenállás nő, ahogy az alábbi ábrán látható.



Szkin mélység 50 Hz-es frekvenciánál



Szkin mélység nagyobb (400Hz) frekvenciánál

Nagy teljesítményigény és feszültség igénybevételek miatt szükség volt **tovább fejlődésre**.

Kisfeszültségű tekercseknél nagy áramok miatt „**látszólagos**” keresztmetszet csökkenés lépett fel, **nagy lett a veszteség**.

Minél nagyobb az átmérő, szkin hatás (eddy-current, örvényáram) miatt **annál nagyobb az AC veszteség**, ezért **nem egy nagyobb keresztmetszetű** vezetőt, **hanem párhuzamos szálakból sodrott vezetőt** használnak.

Lakzománc fejlődése lehetővé tette a *jobb helykitöltésű tényezővel* bíró un. **fonott vezetők** alkalmazását.

1960-as évektől kezdték el alkalmazni a **CTC=Continously Tranposed Conductor (cable)** vezetéseket a trafótekercsek készítéséhez.

A szigetelt sodrat használatával **csökken a szkinhatás**, **kisebb lesz az örvényáram okozta veszteség**. Ilyenkor minden **egyedi szál azonos fluxussal kapcsolódik**, egyik szálból a másikba nem folyik áram, korlátozódik az örvényáram folyása, csökken az örvényáram okozta veszteség.

CTC technológiánál **epoxy kötést** használnak a **nagyobb rövidzárlati szilárdság céljából**.

Jó minőségű zománczott szalag: a zománc szigetelés jósága sorsdöntő a CTC minőségénél.



CTC (Continously Tranposed Conductor (cable) vezetékekről még röviden

A vezető belsejét több indukcióvonal veszi körül mint a széleket, ezért a vezető belsejében nagyobb az önindukciós feszültség keletkezik, így a Lenz törvénye értelmében ez ott jobban akadályozza az áram folyását, mint a széleken.

Nagyobb áramokra több párhuzamos ágból tekercselt spirális tekercset gyártanak, ahol biztosítani kell, hogy valamennyi párhuzamos ág szála ciklikusan váltsák egymást annyiszor, hogy minden vezető minden lehetséges sugárirányú helyzetet felvegyen.

Akár 100 elemi szál is lehet egy kábelben. Egy vezetékcsere 10 cm és néhány méteren belül teljes kiegyenlítés lehet.

Így a **mechanikai szilárdság is nagyobb**, de ha tovább kell növelni a mechanikai szilárdságot, akkor **epoxy gyantával** vonják be és a kemencés vákuumszáritás során **az epoxy megszilárdul.**

Minden egyes párhuzamos **elemi vezeték papírral vagy zománccal szigetelt.** Ezek a kötegek még további papír szigetelésűek. A legkisebb látható vezetéket „kábelnek” is szokás nevezni.

A **klasszikus CTC** gyártása **4 lépésből áll:** kör keresztmetszetű vezeték, lapos hengerlés, zománc szigetelés, epoxy burkolás és folyamatos pozíció cserélés.

FRSL=Frequency Response of Stray Losses
Szórási veszteség frekvenciafüggése

Röviden az FRSL méréstechnikáról

Az **FRSL** módszer nem olyan régi, amelyet a **Hydro-Québec** fejlesztett ki, amikor **felismerték a hagyományos impedanciamérés során**, hogy az FRSL hatásos módszer lehet egy a rövidzár alatt bekövetkezett tekercselmozdulás kimutatására.

Lényegében az **FRSL** módszer egy **hagyományos rövidzárási impedanciamérés**, de **FRSL** esetében **nemcsak 50Hz-en**, hanem a **frekvenciafüggvényében** is mérnek, és a **szórési reaktancia frekvencia függését vizsgálják** (Leakage Reactance Test, LRT).

Az FRSL esetében a **fő figyelem a rezistens (wattos) részre irányul**, LRT esetében azonban **mindkét, ohmos és reaktív komponenst vizsgálják**.

Fontos a **nagyobb frekvenciákon történő mérés (1-600Hz)**, mert a **szkinhatás magasabb frekvenciákon hatásosabb**.

A **CTC** szálak közötti meghibásodás, amelynek hatása esetleg **50Hz-en még nem érzékelhető**, **500Hz-en már olyan örvényáram veszteséget okoz**, hogy a **hiba már érzékelhetővé válik**.

Röviden az FRSL mérés technikáról

Az **FRSL** teszt azokat a helyi túlmelegedéseket detektálja, amelyet **megnövekedett örvényáram** (eddy current), ill. a **CTC** vezetékben létrejött **rövidzár** okozhat.

Ha a **HGA** során olyan jelzés érkezik, hogy „**melegedés, ív**” jelenség léphet fel, akkor a következő lépés az, hogy **behatároljuk a hiba lehetséges forrását**.

Megjegyzendő, hogy a **gerjesztőáram** mérésén alapuló technika esetében a **menetek közötti zárlatot** érzékelhetjük, de a **CTC** pászmában a **szálak** egymás közötti zárlatát **nem**.

Az FRSL eredmények elemzése **leginkább referencia mérésekhez** való hasonlítás alapján történhet. Ugyanazon trafón mért eredményekkel történő összehasonlítás alapján **becsülhető az időbeli változás, a romlás**.

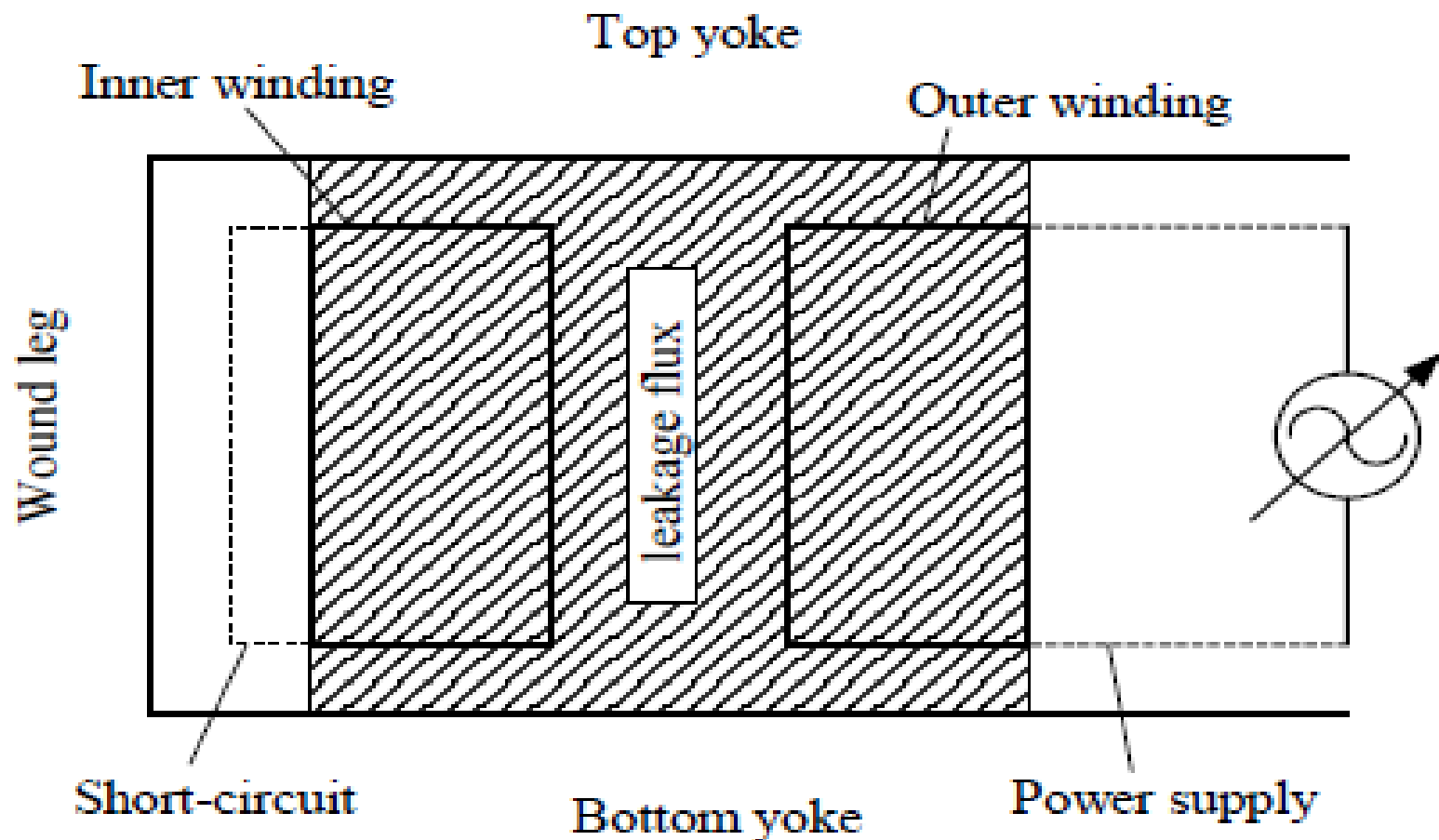
Természetesen **ha nincs referenciamérés** akkor is hasznos az FRSL módszer, mert **az egyes fázisok összehasonlításával is becsülhető a meghibásodás**.

Ha egy **CTC** vezetéken **rövidzárlat** van, akkor olyan **FRSL** görbék adódnak, amelyek **alacsony frekvencián egybeesnek**, majd a **magasabb frekvencián kezdenek eltérni egymástól**.

A CIGRE **A2.34** munkabizottságának útmutatója szerint **15%-os eltérés a hibakritérium, ekkor kell hibára gondolni**.

Egyenértékű ellenállás mérése

A **szórási reaktanciát** a tekercs geometriája határozza meg, azaz, **az a tér**, ami a **belső tekercs belső átmérője** és a **külső tekercs külső átmérője**, valamint a **felső és az alsó jármok közötti elterül (szórési csatorna)**.

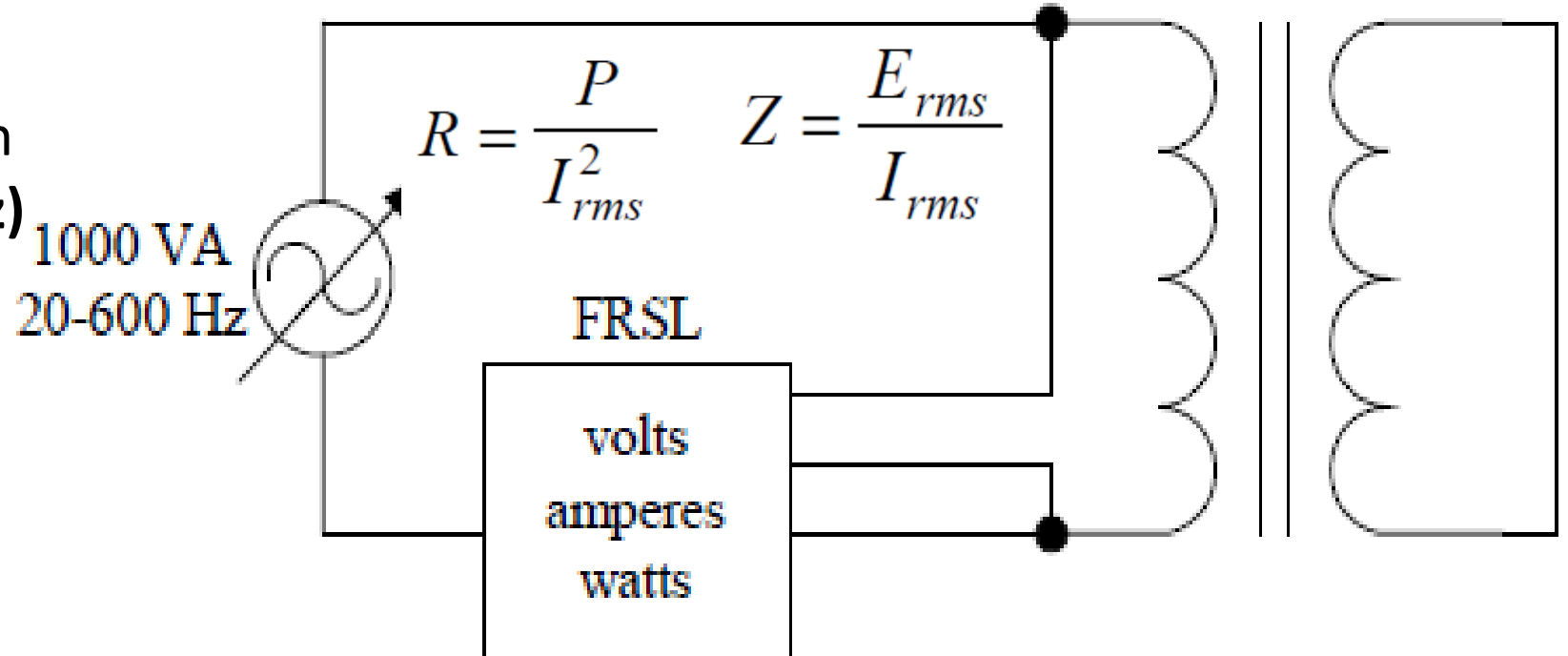


Adott tekercs és adott tekercsvastagságoknál, **zárlati méréseknél** a **szórási fluxus** egy része az **ábrán látható módon metszi a vezetékeket** a tekercs mentén és a végeken.

FRSL vizsgáló áramkör

Az alábbi ábrán látható, hogy az **FRSL mérő áramkör lényegében ugyanaz**, mint amit a **zárlati impedancia mérésére használunk**: nagyfeszültségű oldalon (HV) tápláljuk meg a trafót, a megfelelő kisfesz (LV) oldali tekercset rövidre zárjuk. A betáplálás feszültségét és áramát a HV tekercsen mérjük. Komplex impedancia mérőt is alkalmazunk, de nekünk a komplex impedancia **rezisztív része kell**. Komplex impedancia mérő helyett **egy wattmérőt is használhatunk** a komplex impedancia **rezisztív részének** meghatározásához.

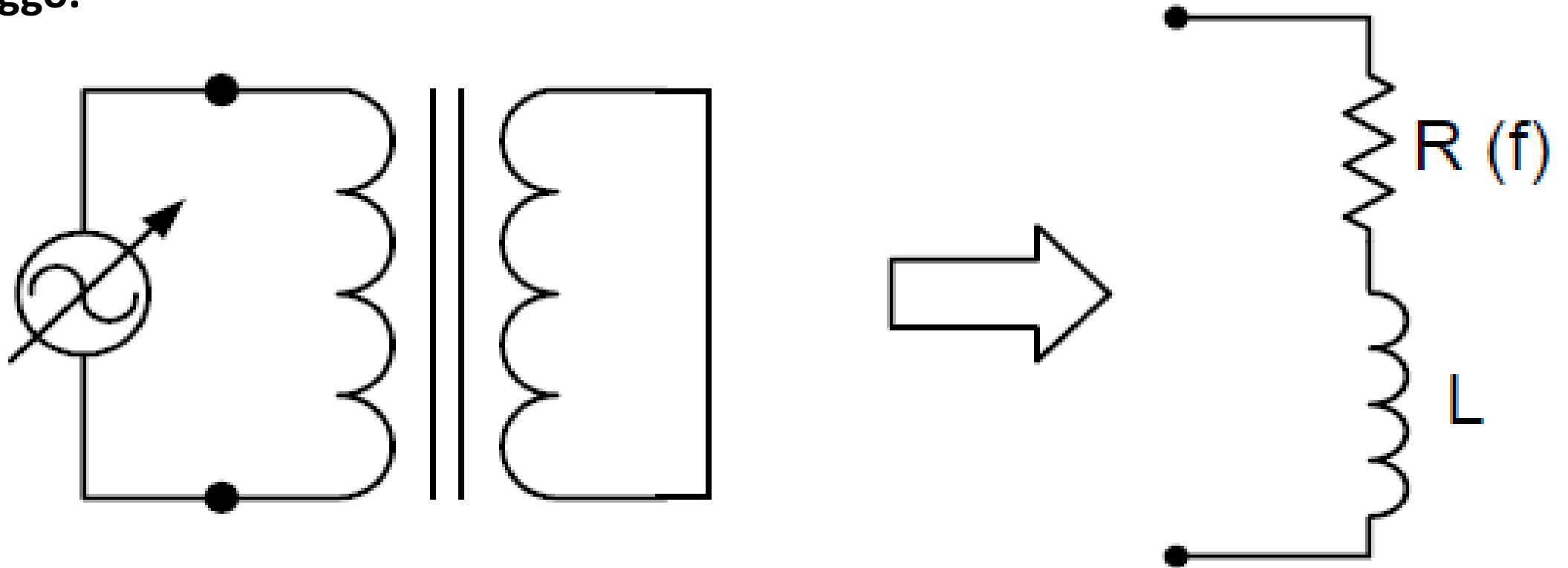
Eltérés az impedancia méréstől, hogy FRSL esetében **általában a 20-500 Hz (600Hz) tartományban** (beleértve az 50Hz-et is) hajtjuk végre a mérést. **FRA** technikánál pl. 10kHz-1MHz-es impedancia tartományt mérjük.



Tehát az **FRSL** mérő áramkör **azonos az impedancia mérő áramkörrel**, de a mérést **nem csak 50Hz-en**, hanem adott frekvencia tartományban végezzük, pl. **20-600Hz között**.

Az **egyenértékű rövidzárási impedancia ellenállás és a reaktancia komponensei képviselik a rövidrezárt trafó szórási veszteségét, szórási reaktanciáját.**

A szórási veszteséget képviselő „R(f)” frekvenciafüggő és érzékeny a tekercs elmozdulására. A mérési adatokból főleg ellenőrzési okok miatt számoljuk még az „L” értékét is, amely nem frekvenciafüggő.



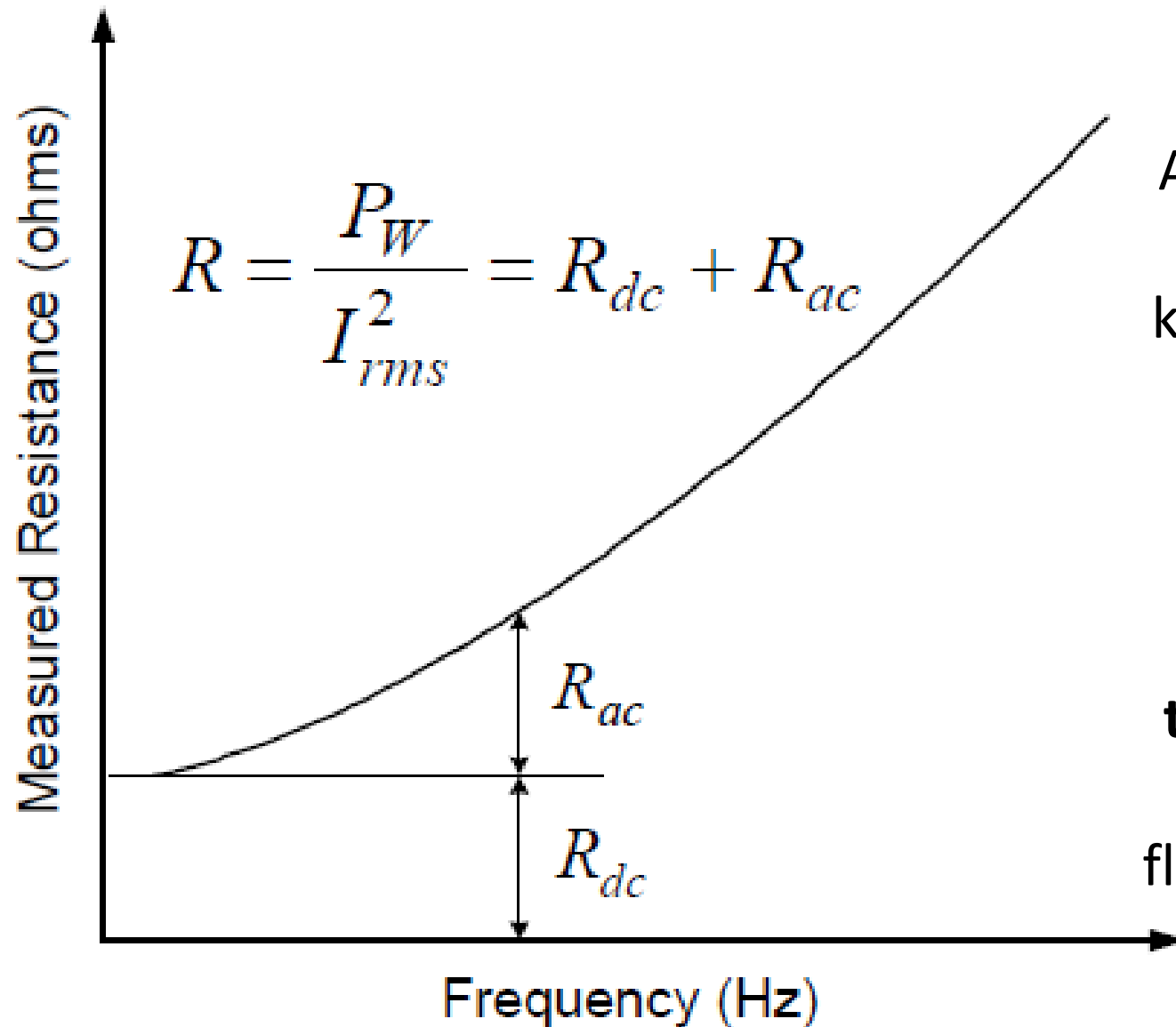
Egyenértékű ellenállás mérése

Amikor a tekercs **deformálódik**, a **tekercsek egyike elmozdul**, a **vezető megdől**, a **szórási fluxus mágneses pályája módosul**, a fluxussal kapcsolódó felület változik, a **szórási veszteség változik**, ami megváltoztatja a **szórási reaktancia mérési eredményt**, az egyenértékű ellenállást a **frekvencia függvényében**.

A következő ábra az ***egyenértékű ellenállás tipikus frekvenciafüggését*** mutatja. Az R_{dc} komponens megfelel a gerjesztett és rövidrezárt tekercsek **DC ellenállásának**.

A **szórási veszteséget** ez az R_{ac} komponens képviseli.

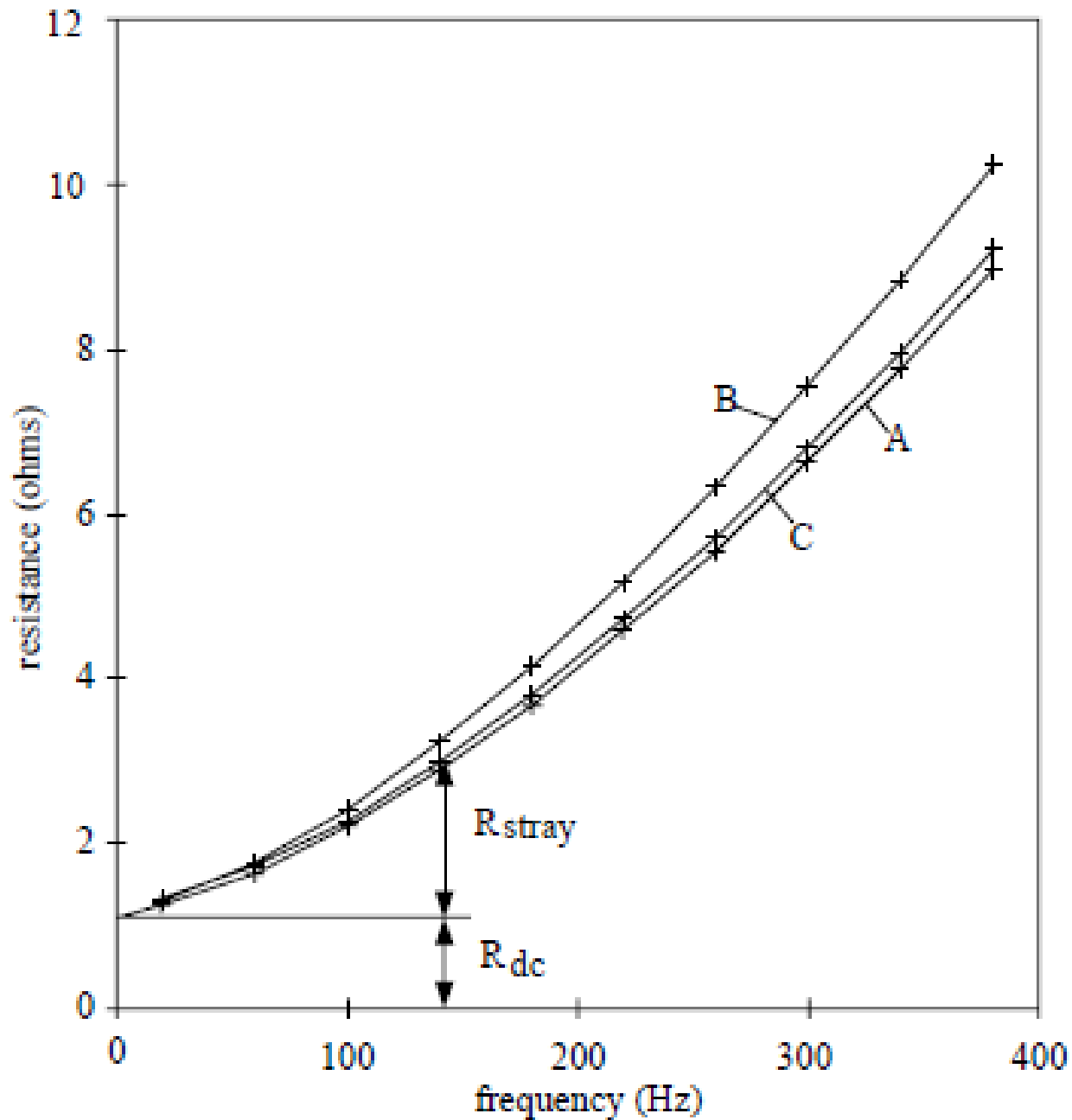
Egyenértékű ellenállás tipikus frekvenciafüggése



Az rövidzárási impedanciamérésnél van **valós és képzetes** rész egyaránt, vagyis két értéket kapunk, a **valós rész a szórási reaktancia**.

Az **FRSL** azonos a szórási reaktancia méréssel.

Az **FRLS**-nél a **valós rész két részből tevődik össze**: DC tekercs ellenállásként mért **vezeték veszteség (R_{dc})** és a szórt fluxus okozta **örvényáramveszteség (R_{ac})**.



Egy példa, amikor a fázisok közötti eredmény nem ad azonos frekvenciamenetet.

Az ábrán látható, hogy a „B” fázisban a szórásvesztés 15%-al nagyobb, mint az „A” és „C” fázisban, ami kritikus érték az FRSL diagnosztikában.

Induktivitás (L), mérése, ill. kiszámítása

A mérő áramforrásnak **minimális harmonikus tartalommal bíró szinuszos feszültséget kell szolgáltatni**. Az FRSL vizsgálat során mérjük a **feszültség (E_{rms}) és az áram (I_{rms}) effektív értékét**, valamint a **wattos teljesítményt (P)** az adott frekvenciatartományban (20-600Hz), **beleértve az 50Hz-en történő mérést is**. Szinuszos esetben az **alábbi egyenleteket használhatjuk az induktivitás számításához az impedanciából és az egyenértékű ellenállásból**:

$$R = \frac{P}{I_{rms}^2} \quad Z = \frac{E_{rms}}{I_{rms}} \quad L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{2\pi f}$$

Az „L” induktivitás számolása **jó kontrol lehetőség** is méréssel kapcsolatban, mert az **induktivitás (L) értéke**, amelynek állandónak kell lennie, vagy kismértékben változnia a **frekvencia függvényében**, kiválóan jelzi, **hogy vajon az áramteszt jól zajlott le**.

A **szórási fluxus által képviselt mágneses ellenállást** nagyban meghatározza a **belső és a külső tekercs**, valamint a **felső/alsó járom által meghatározott szórásicsatorna**.

Ha **tekercselmozdulás, geometriai torzulás lép fel**, akkor a szórási csatorna, valamint a **mágneses ellenállás is megváltozik**, **így változik a fentiek szerint mért impedancia is**.

FRSL (szórási veszteség) mérési eredmények kiértékelése

FRSL (szórási veszteség) mérés kiértékelése

FRSL **nem abszolútértékeken**, hanem **görbék összehasonlításán** alapuló diagnosztika.

Az összehasonlítást végezhetjük **hasonló típusú, ill. ugyanazon trafón** végrehajtott **korábbi mérés** adatai között.

Háromfázisú trafók esetén kézenfekvő a három fázis adatainak az összehasonlítása.

Az **impedancia adattábla** értéke FRSL esetén járulékos referencia (50Hz-es impedancia).

A gyakorlat az mutatja, hogy amikor az **aktív rész a tartályban** van, a **„B” fázisban a veszteségnek kisebbek** is, mint az „A” és a „C” fázisokban.

Mint **általános szabály, ugyanazt a kapcsolást kell alkalmazni**, hogy összehasonlítható elemzést végezhesünk, azaz **ugyanazt tápáramkört és rövidrezárt tekercset**.

Ha 2-3% a különbség a fázisok között érdemes a **korábbi mérésekkel történő összehasonlítás**, mert képet kaphatunk a bekövetkező változásról.

Háromfázisú transzformátor vizsgálatai

Célszerű **háromfázisú áramforrást** használni a mérésekhez, hogy utánozhassuk a **normál üzemben** a tekercsekben indukálódott szórt fluxust.

Ha azonban **egyfázisú áramforrásunk** van, akkor **három mérést kell végrehajtani** olyan konfigurációban, ahogy az impedancia méréseknél is történik.

Például, nagyfeszültségen csillag, kisfeszültségen deltakapcsolású tekercseknél ajánlott a **mérés nagyfeszoldalról történő végrehajtása**, mert az egyenértékű ellenállás nagyobb, és így könnyebb mérni. Minden esetben **úgy ajánlott a méréseket elvégezni**, hogy minél **jobb legyen a korreláció** a mért *veszteség és az elmozdulás között*.

Mérési pontosság

Wattos teljesítmény mérése

A wattos teljesítménymérő **pontossága határozza** meg a frekvencia függvényében történő mérést. Ajánlott a **legnagyobb pontosságú wattmérő** alkalmazása kis teljesítménytényező ($\cos\Phi=0,01$) mellett a teljes frekvencia tartományban.

A feszülteget a trafó kapcsain kell mérni. Ha az áramot a **wattmérőbe épített sönttel** mérjük, akkor figyelembe kell venni a feszültségjel mérőkábelben történő **terjedését** (kb. 3ns/m), mert hibát okozhat a wattos teljesítmény mérésnél, **mert késik a feszültségjel az áramjelhez képest.**

Emiatt fontos, hogy **minél rövidebb kábelt használjunk a kapocsfeszültség mérésére.**

Összehasonlító eredmény kapása céljából ajánlott mindig **ugyanazt a kábelt használni.**

A vezetőben megjelenő járulékos veszteségeket **a szórási fluxus által indukált feszültség okozza.**

Az indukált feszültség **okozza az áramot**, amelynek nagyságát **az anyag ellenállása korlátozza.**

Növekvő hőmérséklettel az anyag ellenállása növekszik, az indukált feszültség miatti áram csökken, következésképpen **a veszteség is csökken.**

Ez az **ellenkezője ami történik a rezisztív veszteség esetén**, amelyet nem az indukált feszültség okoz, hanem **az az áram, amelynek értékét a tényleges terhelés határoz meg.**

Érdemes megjegyezni, hogy a **Megger SFRA** mérőberendezése tudja az **FRSL** mérést is.

CIGRE WG A2.34, TB 445 – Frequency Response of Stray Losses (FRSL)

| | |
|---------------------------|---|
| | |
| Detektálható hibák | Szórási fluxushoz köthető megnövekedett örvényáram veszteség miatti helyi melegedés. CTC (Continuously Transposed Conductors) kötegben párhuzamos szálak közötti rövidzár. |
| Hibára utalás | Ha a CTC-ben a párhuzamos szálak között zárlat van, a szórási csatornában a veszteségek megnőnek. Ez magas hőmérsékletet eredményez, amely általában HGA-val kimutatható. |
| Teszt módszer | Változtatható frekvenciájú (általában néhány Hz-től néhány száz Hz-ig) AC tápforrást kapcsolunk a HV tekercs minden egyes fázisára és az LV tekercsüket rövidre zárjuk. MÉRJÜK a tápforrás áramát és a HV tekercs feszültségét. A nagyobb frekvenciájú rövidzárási impedancia AC ellenállása képviseli a szórási veszteséget. A komplex impedancia rezisztív részét kell mérni. Ehhez komplex impedancia mérőt használjunk. Komplex impedancia mérő berendezés helyett wattmérőt lehet használni, hogy a komplex impedancia valós részét meghatározzuk. |
| Referencia | Három fázis összehasonlítása, újlenyomat mérések (egy fázisú tesztek). |
| Kiértékelés | ΔL : legyen kisebb, mint 2,5% a fázisok között ΔR : Legyen kisebb, mint 15% a fázisok között |
| Megjegyzések | A vizsgálatot el lehet végezni az LV oldalról is. Ekkor az eredményeket át kell számítani az áttétel négyzetével |

CIGRE A2.34 WG TB az alábbiakat ajánlja az FRSL kiértékelésre:

- 1. Ha ΔR AC ellenállás csak 2-3% lenne, vagyis ennyivel különbözne az egyik fázis a másiktól, akkor valószínű, hogy párhuzamos szálak közötti rövidzárlat léphetett fel. Ezért további vizsgálatok szükségesek, főleg a korábbi mérésekkel történő összehasonlítás, milyen változások következtek be.**
- 2. ΔL legyen kisebb, mint 2,5% a fázisok között.**
- 3. ΔR AC ellenállás legyen kisebb, mint 15% a fázisok között.**

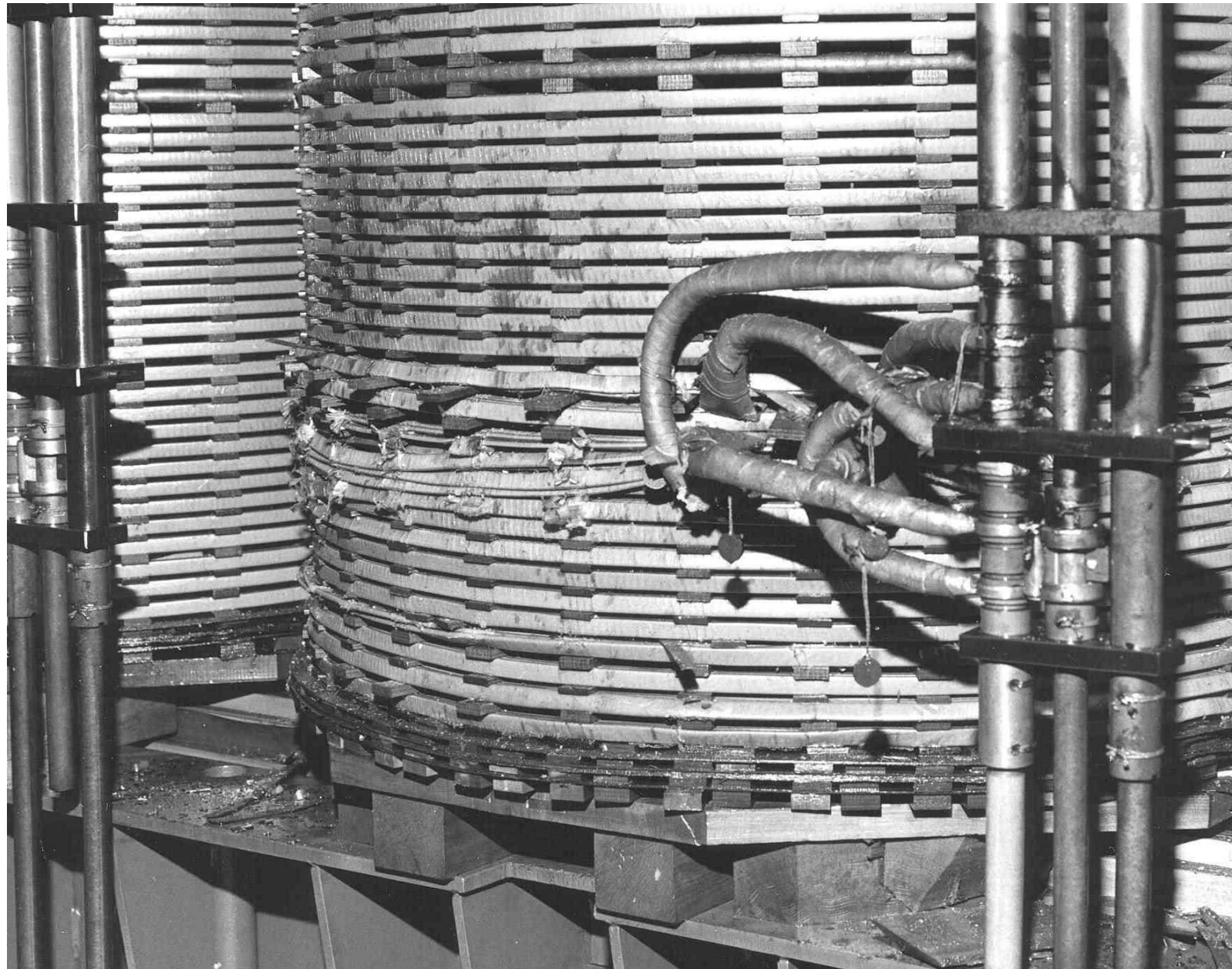
FRSL esettanulmányok

1. számú FRSL esettanulmány

Esettanulmány: 33,33 MVA, 121/12,85kV, Y / Δ trafó

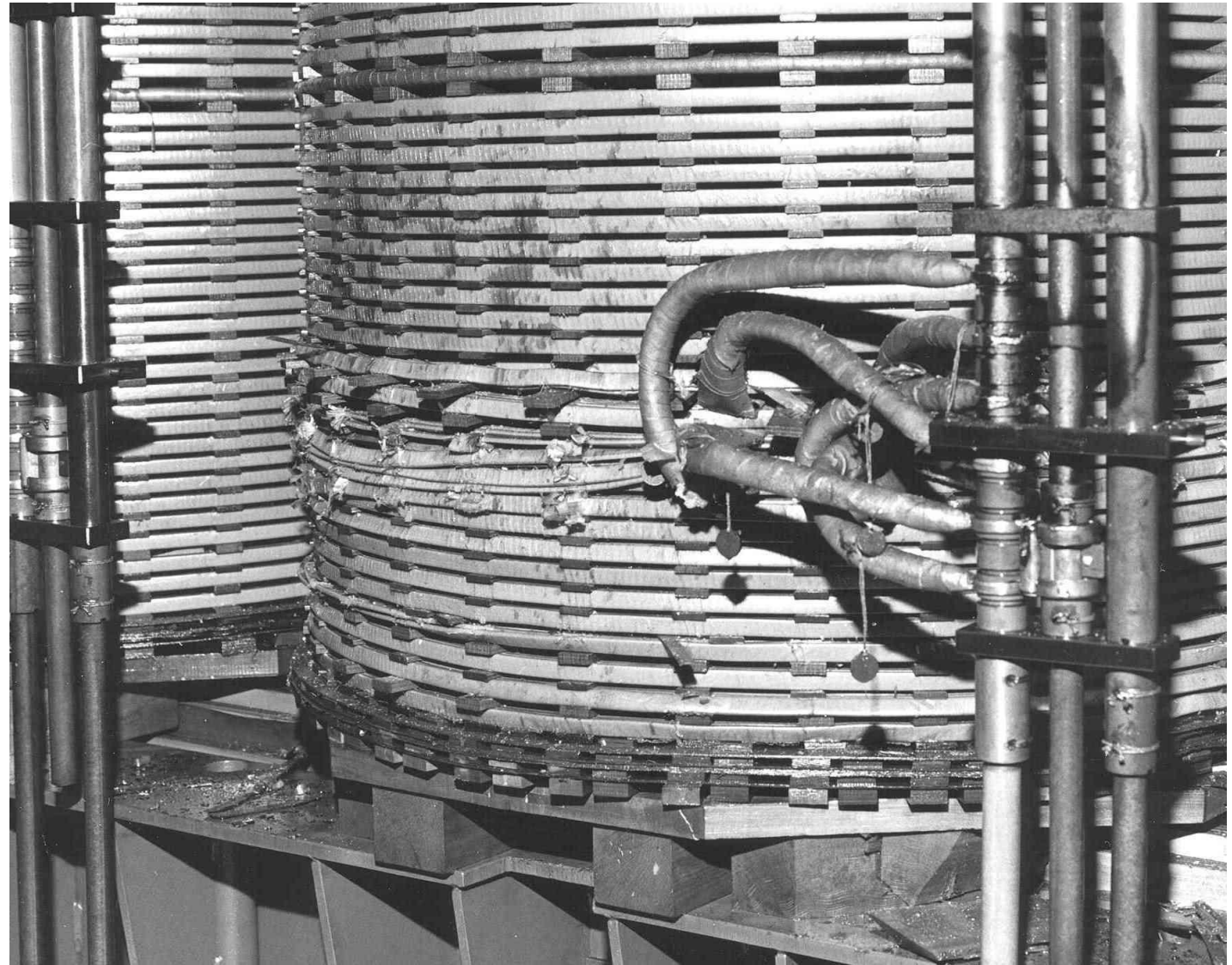
**1. esettanulmány:
33,33MVA, 121/12,85kV,
Y/Δ trafó**

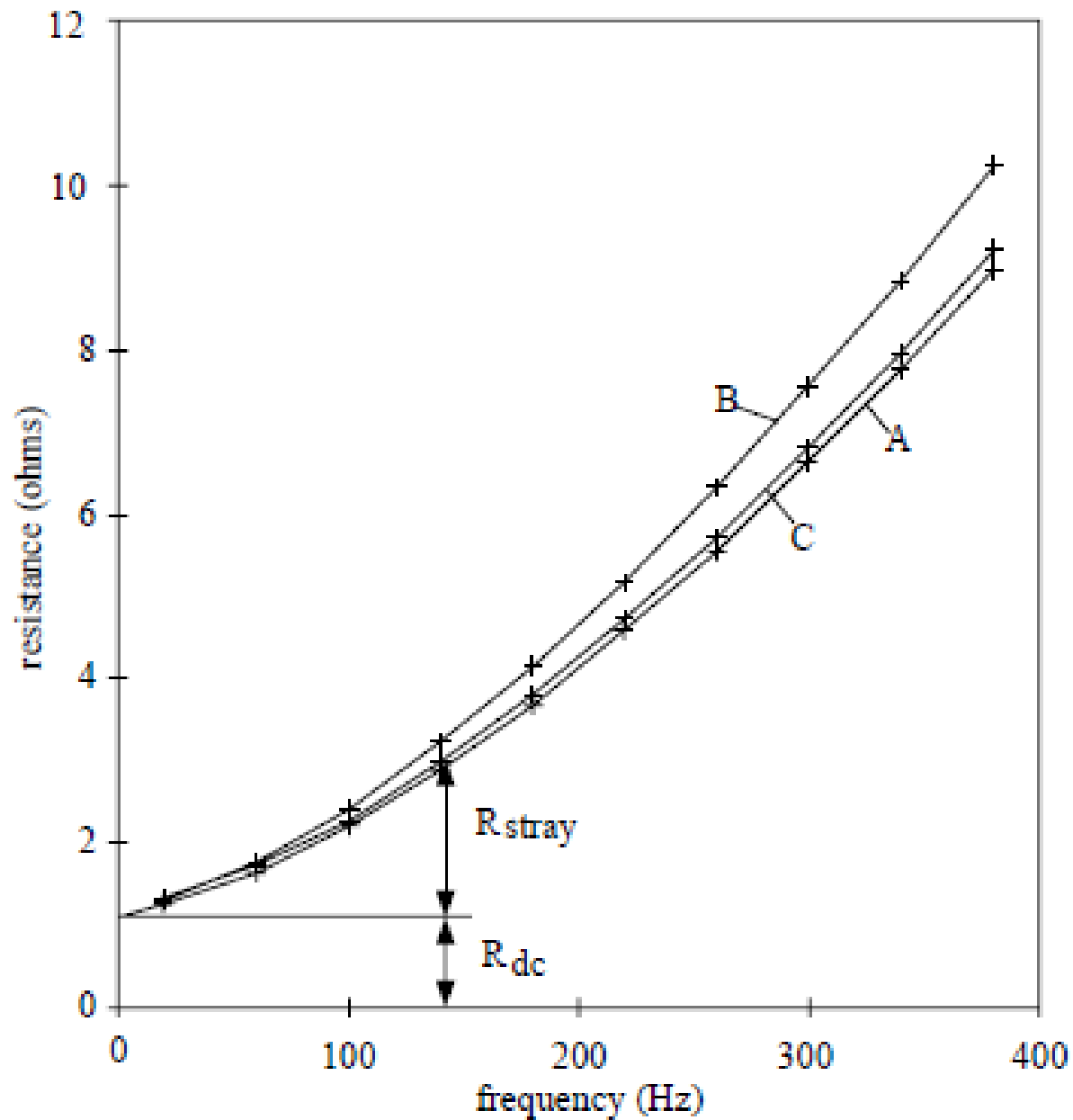
(No load tap changer)
nem_terhelés alatti
feszültség szabályozón (NO-
LTC) elszenesedés miatt **rossz
érintkezés mérhető, gázrelé
általi kioldás történt.** Az
ábrán látható, hogy milyen
deformáció jött létre a „B”
fázisú primer tekercsben: a
tekercs egy részén radiális
elmozdulás látható.



Annak ellenére, hogy **látható a tekercs torzulása és meghibásodása, a szokásos mérések eredményei** nem utalnak hibára, azaz:

- Az **áttétel** megtartotta értékét,
- Az egyenárammal mért **ellenállása nem változott,**
- A **gerjesztőáram nem volt érintett,**
- Az **impedanciamérés** nem mutat semmit a másik fázisok felé, miután a változásuk **1% alatt maradt.**



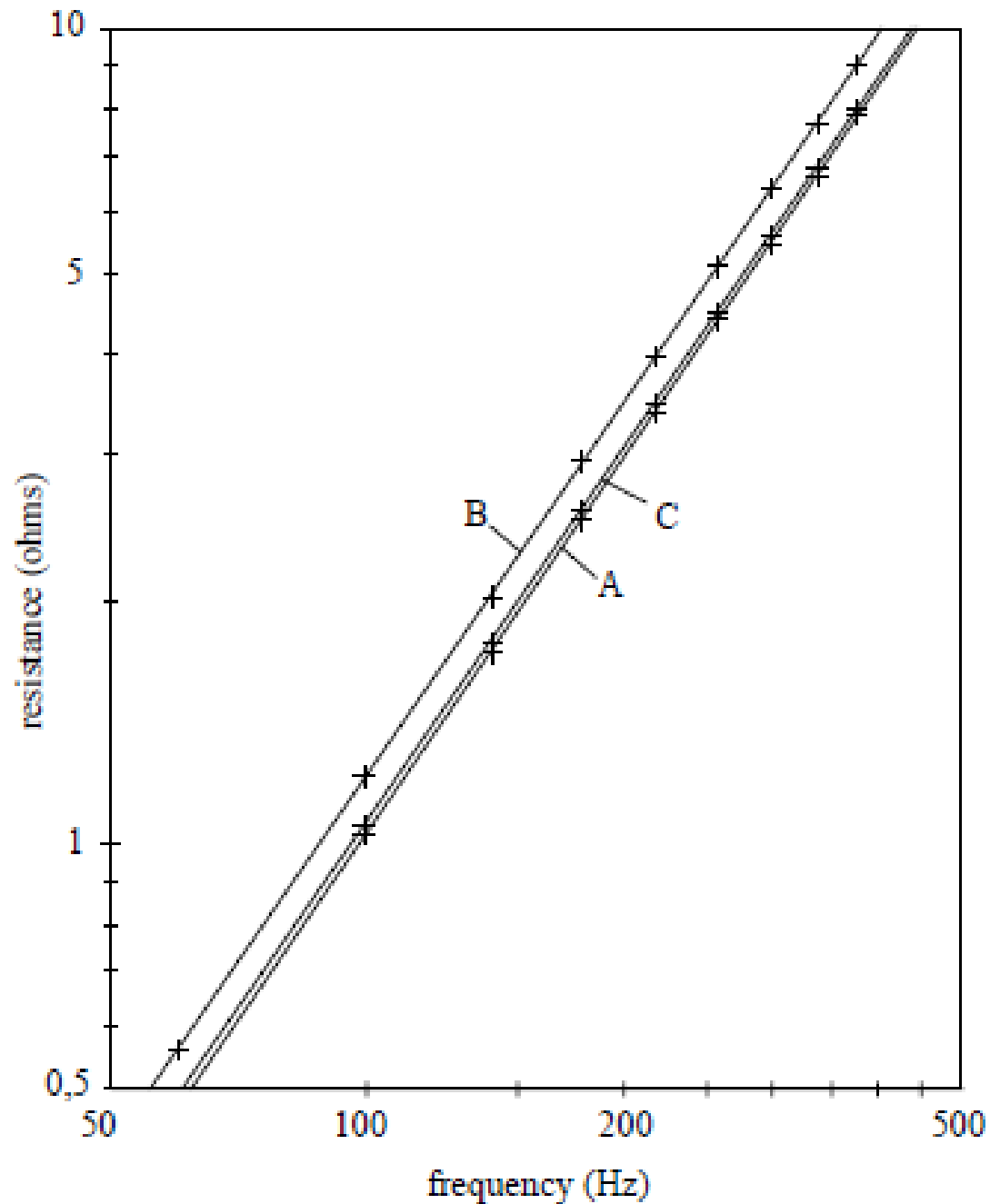


A fluxus örvényáramot hoz létre a vezetőben, amely annál nagyobb, minél nagyobb a fluxussal kapcsolódó keresztmetszet és minél nagyobb a frekvencia.

A mellékelt ábra a szórási veszteség által megjelenített ellenállást a frekvencia függvényében, valamint az egyenáramú ellenállást mutatja.

Ha egy tekercs elmozdul, a fluxusvonalak eloszlása megváltozik, így megváltozik a szórási veszteség is, következésképpen megváltozik az egyenértékű ellenállás a frekvencia függvényében.

Az ábrán látható, hogy a „B” fázisban a szórási veszteség 15%-al nagyobb, mint az „A” és „C” fázisban.



Ha az **ellenállás értékét logaritmikus skálájú koordinátarendszerben ábrázoljuk (log-log)**, mint az a **mellékelt ábrán látható, egyszerű tapasztalati összefüggés állapítható** meg a **szórási veszteségből számolható ellenállás és a frekvencia között**. Jelen esetben az „ α ” tényező **1,5 értékű**. Tehát ez egy **tapasztalati modell**.

Az **FRSL elemzés azt mutatja, hogy a szórási veszteséget megjelenítő egyenértékű ellenállás rendszerint növekszik a frekvenciával 1,4 – 1,8 hatványkitevővel**. Ez az érték kisebb, mint a szakirodalomban javasolt 2-es kitevő.

$R_{stray} = kf^\alpha$ alapján, az alábbi egyenlet megmutatja, hogyan határozzuk meg különböző frekvenciákon az egyenáramú veszteségre vonatkoztatott járulékos veszteséget:

$$\Delta P(\%) = \frac{kf^\alpha}{R_{dc}} \times 100$$

Az előző esettanulmány sérült transzformátora esetében a járulékos veszteség 600Hz-en eléri a 47%-ot.

A fenti **egyenletet felhasználhatjuk** a CTC vezetékben a **váltások minőségi validálására**, mivel a paralel szálak közötti folyó köráram **növeli a veszteséget 50Hz-en az egyenáramú veszteséghez képest**.

Az FRSL mérés általában **képes detektálni** más hibát, vagy szórási veszteség okozta tervezési hibát.

3. számú FRSL esettanulmány

333,3MVA, 525/242/22kV-os egyfázisú autótrafó

3. számú FRSL esettanulmány bemutatása

Ez az eset egy 333,3MVA-ess, 525/242/22kV-os autótrafó „C” fázisáról szól. A trafót 2011-ben helyezték üzembe Thaiföld EGAT alállomásán és 5 évig, 2016-ig **normál módon üzemelt. 2016-ban a rendszeresen végzett HGA diagnosztika „túlmelegedés” hibagyánút jelzet (magas hőmérséklet, ívelés), mialatt a másik két fázis megfelelő állapotot mutatott. Minden IEC által ajánlott teszt végrehajtásra került.**

A trafó műszaki adatai az alábbi táblázatban találhatóak.

| | |
|-----------------|--|
| Type | single-phase auto-transformer, step down |
| Phase | C |
| Rated power | 333.3 MVA |
| Rated voltage | $(525/\sqrt{3})/(242/\sqrt{3})-22$ kV |
| Vector group | YNa0d1 |
| MFG. year | 2010.07 |
| First energized | 2011 |

3. számú FRSL esettanulmány: HGA eredmények bemutatása

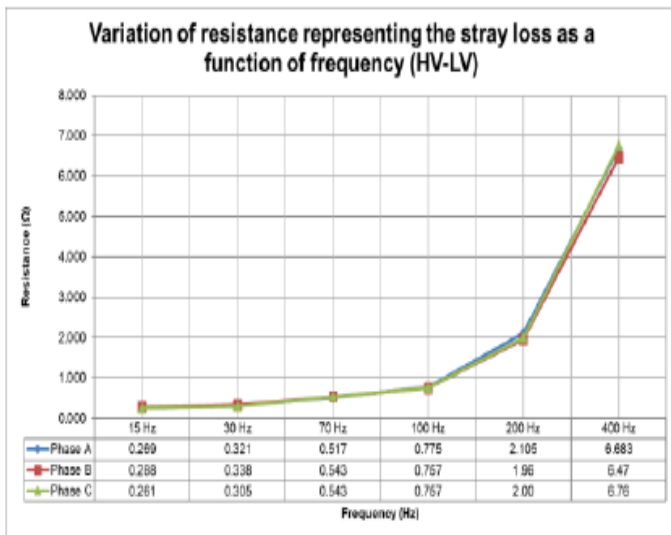
A 2016-ban, 5 évvel az üzembe helyezés után, 5 éves normál üzeme után, a **HGA eredményeknél a C₂H₄ (etilén) kulcs gáz magas hőmérsékletet, a C₂H₂ (acetilén) kulcsgáz pedig ívet jelzett**. Egy hónappal később, a **megismételt HGA teszt** során azt tapasztalták, hogy a gázok általában **emelkedő** trendet mutatnak (lásd a HGA táblázatot).

| Date | O ₂ | N ₂ | CO ₂ | CO | H ₂ | CH ₄ | C ₂ H ₂ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₆ | C ₃ H ₆ | C ₃ H ₈ | TDCG |
|-----------|----------------|----------------|-----------------|-----|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|
| 14 May 12 | 5706 | 18499 | 310 | 66 | 9 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 76 |
| 11 Oct 12 | 4703 | 15657 | 288 | 85 | 10 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 96 |
| 25 Mar 13 | 8417 | 26731 | 327 | 102 | 12 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 116 |
| 18 Dec 13 | 6827 | 18313 | 450 | 195 | 6 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 203 |
| 24 Apr 14 | 6935 | 18416 | 368 | 99 | 7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 108 |
| 24 Dec 14 | 1779 | 14810 | 569 | 208 | 5 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 219 |
| 23 Apr 15 | 1592 | 13990 | 573 | 236 | 4 | 3 | 0 | 0 | 2 | 2 | 2 | 249 |
| 14 Oct 15 | 6108 | 20896 | 289 | 104 | 2 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 110 |
| 7 May 16 | 14777 | 71486 | 643 | 175 | 92 | 208 | 2 | 369 | 69 | 275 | 17 | 1207 |
| 3 Jun 16 | 7209 | 20763 | 653 | 310 | 152 | 317 | 1.3 | 493 | 73 | 231 | 15 | 1592.3 |

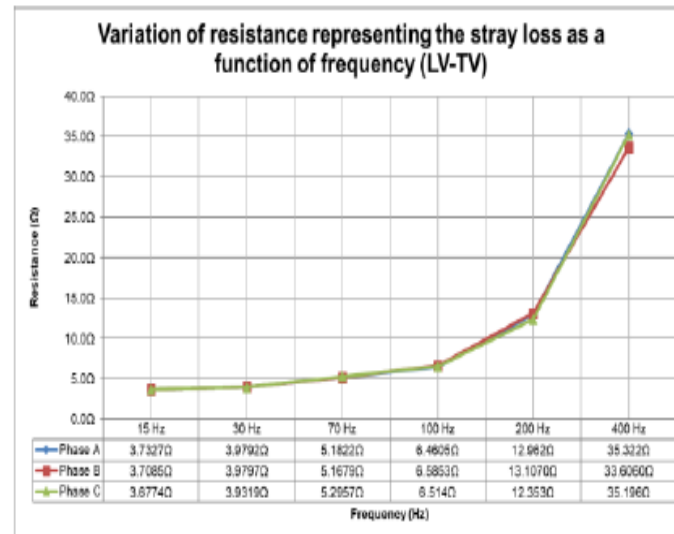
3. számú FRSL esettanulmány: „C” fázisú villamos mérések bemutatása

Említésre került, hogy minden IEC által ajánlott vizsgálatot (8) elvégezték, ahogy az az alábbi táblázatban látható: áttétel, gerjesztőáram, szórási reaktancia, tekercsellenállás, vasmag és tekercsek szigetelési ellenállása, tekercs, átvezető és olaj δ , tekercs és átvezető „C”, FRA. Mind a 8 diagnosztika normál állapotú eredményeket adott (lásd a táblázatot).

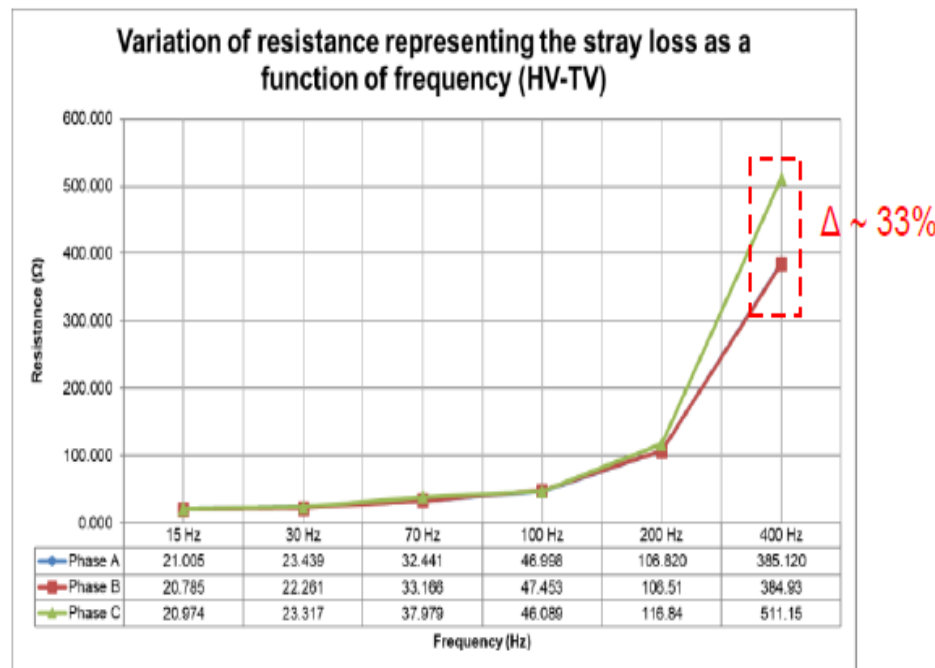
| Test items | Test results |
|--|---|
| 1. Turn ratio | Good condition and no short turn |
| 2. Exciting current | |
| 3. Single phase leakage reactance | Good condition and no winding deformation |
| 4. Winding resistance | Good condition and no bad connection |
| 5. Insulation resistance of core and winding | Good condition |
| 6. Insulation power factor of winding, bushing and oil | Good condition |
| 7. Capacitance of winding and bushing | Good condition |
| 8. Frequency response analysis (FRA) | Good condition compared with other phases |



(a) HV-LV connection : normal



(b) LV-TV connection : normal

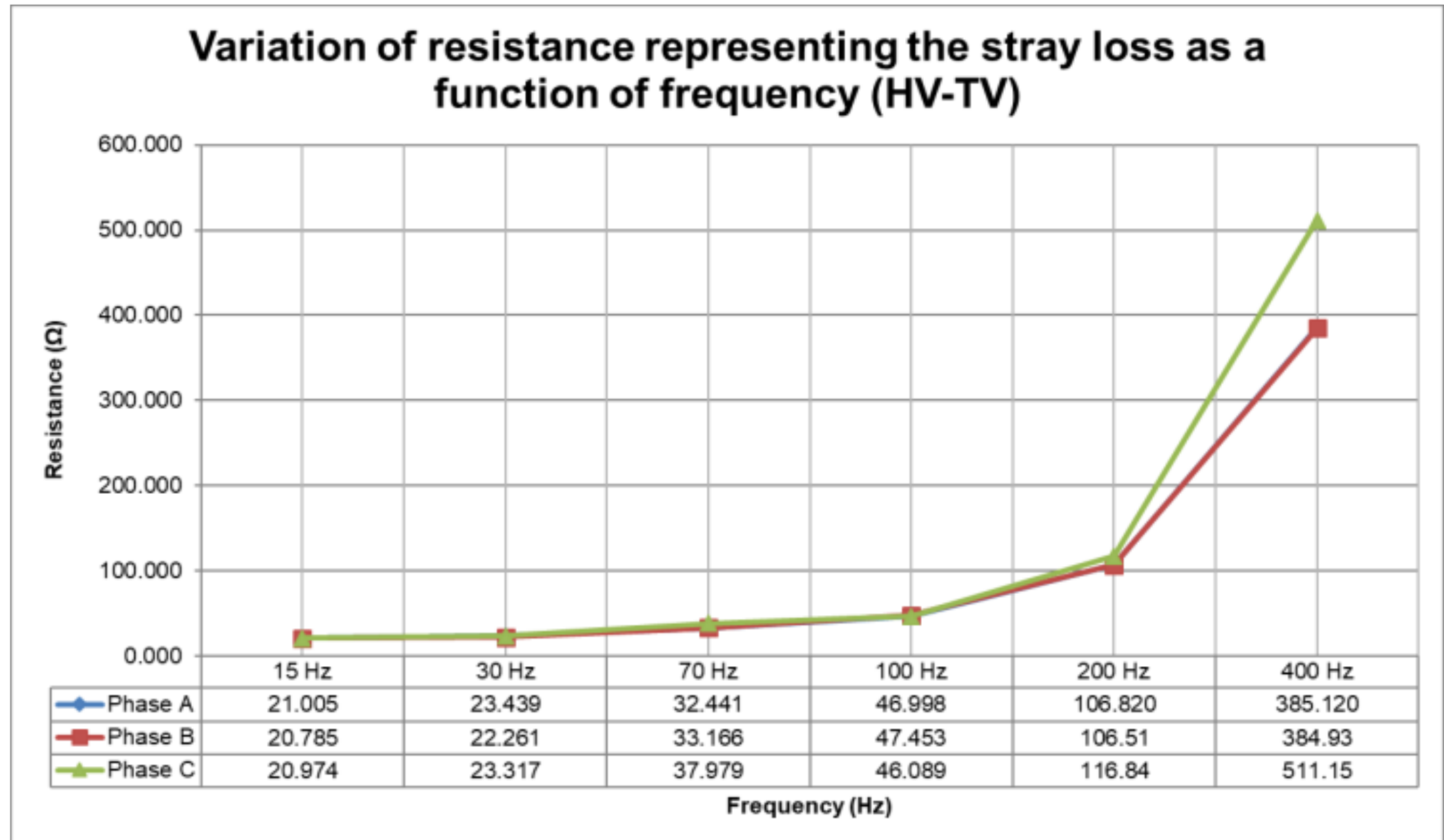


„FRSL” mérési eredmények bemutatása

A szórási veszteség mérések a 15-400Hz-es tartományban lettek végrehajtva, úgy hogy 3 amper áramot injektáltak mindegyik tekercsbe (HV-LV-TV) és mindegyik fázisba (A-B-C).

A HV-TV kapcsolásban a „C” fázisban, az AC ellenállás által képviselt örvény áramú veszteség jóval nagyobb, 33%-al volt nagyobb, mint a másik két fázisban, ahogy az ábrákon is látható.

HV-TV kapcsolatban az FRSL eredmények már nem normál állapotot mutatnak



FRSL mérési eredmények tanulmányozása

Az üzemeltető konzultált a gyártóval, hogy még a helyszínen egy kibontással járó belső vizsgálatot végezzenek és akkor a vasmag tetején szokatlan dolgot tapasztaltak.

Egy kis darab **fém csővezeték feküdt a vasmag tetején, amely ívelést okozott a vasmag lemezei között**, ahogy az alábbi ábrákon látható.



(a)



(b)



(c)



(d)

Az mondható, hogy a vasmag tetején a fémcső okozta örvényáram veszteség növekedés hatással van az FRSL eredményekre.



(a)



(b)



(c)



(d)

Egy darab fém csővezeték feküdt a
vasmag tetején



Egy darab fém csővezeték feküdt a
vasmag tetején (zoom),



Ívelési részek a vasmag tetején



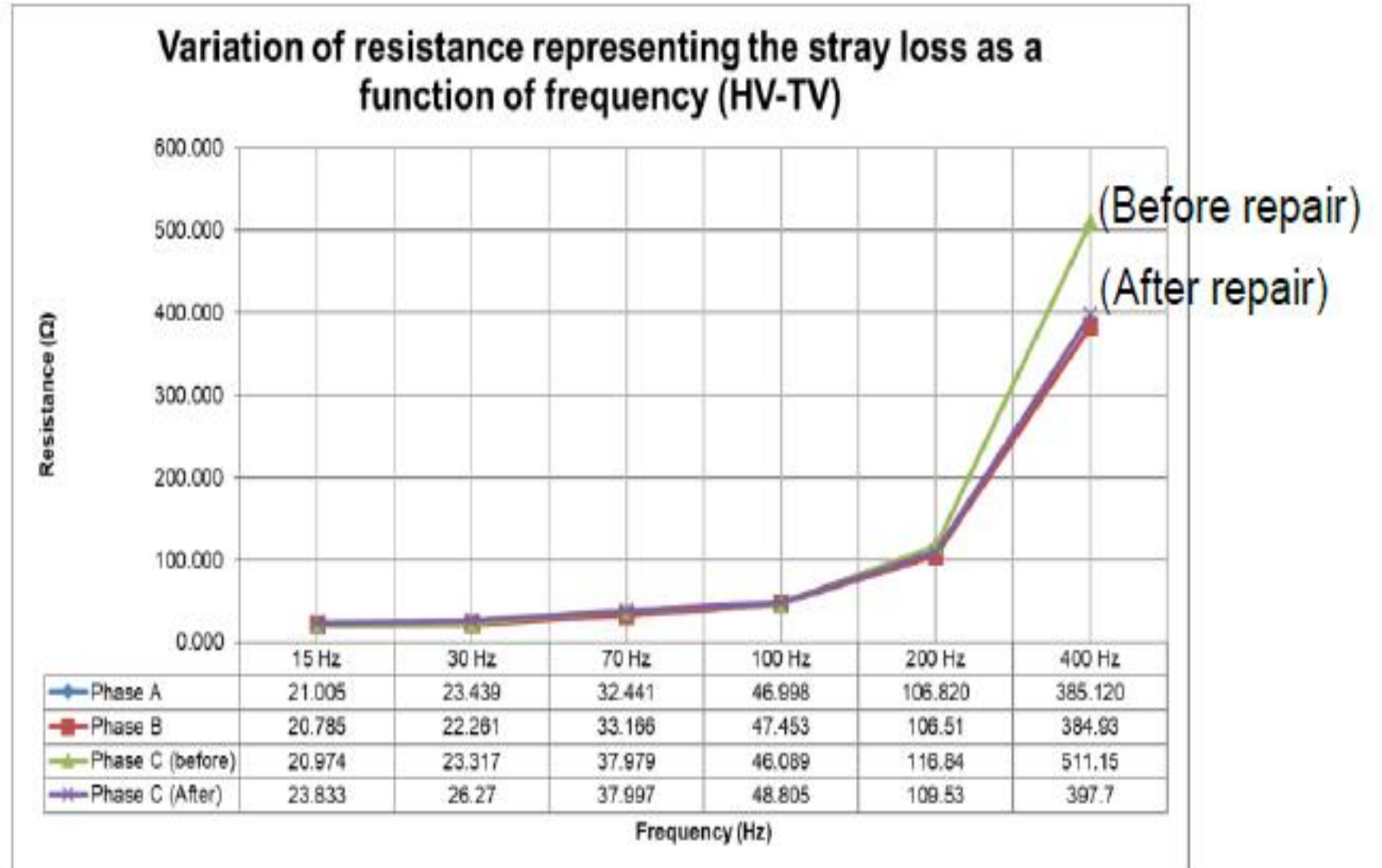
Ívnyomok a kis darab fém csővezetéken



A javítás utáni vizsgálatok

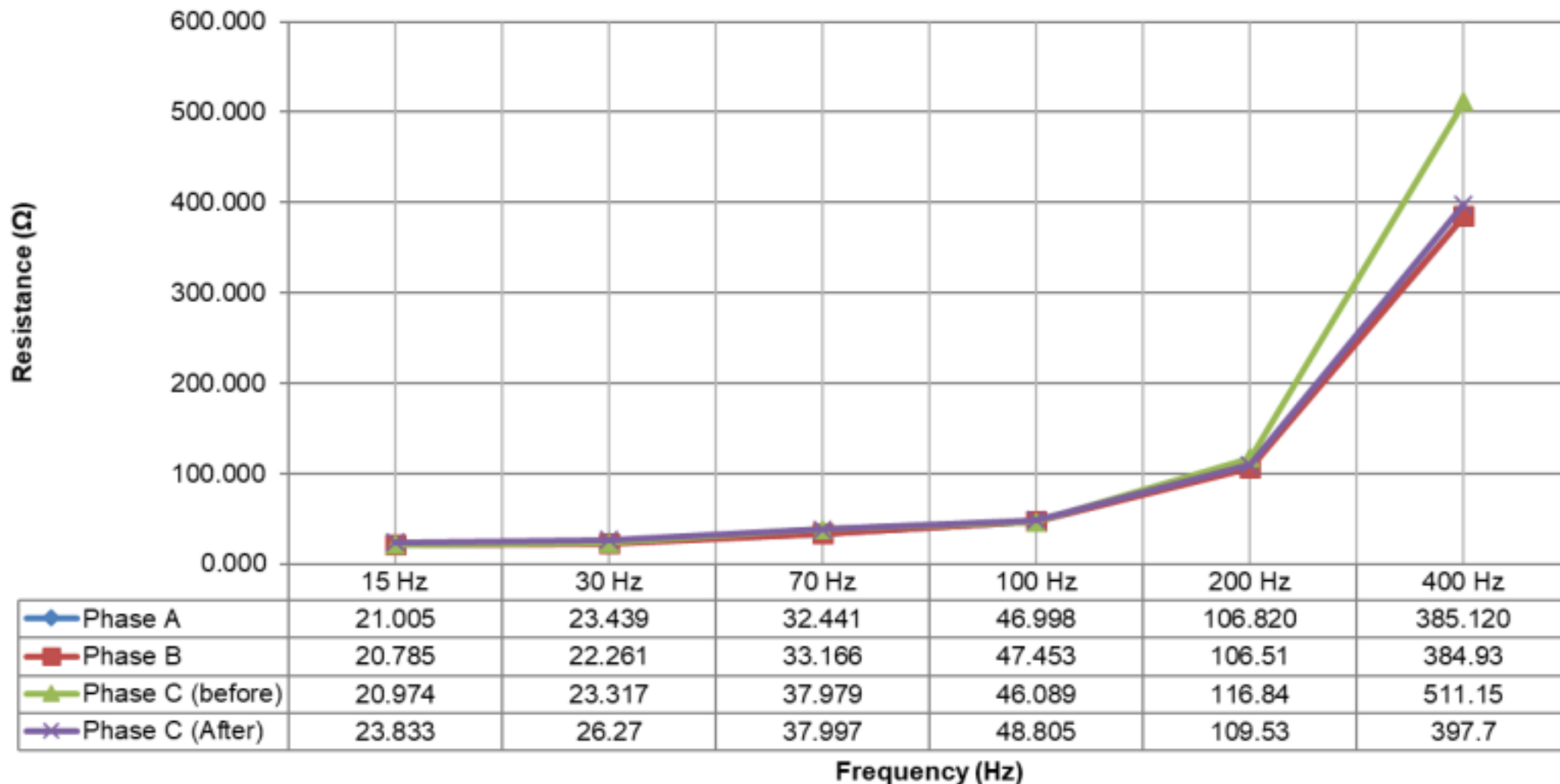
- A trafót elvitték az üzemeltető EGAT javítóműhelyébe javításra.
- **A javítás után** komplett vizsgálat sorozatot végeztek, beleértve PD méréseket, valamint HGA vizsgálatot, hogy meggyőződjenek az aktív rész és a szigetelés jóságáról.
- Ugyancsak összehasonlították a **javítás előtti és utáni FRSL eredményeket** (lásd az FRSL görbéket).

Szórási veszteség okozta ellenállás változás a frekvencia függvényében



FRSL teszt eredmények összehasonlítása

Variation of resistance representing the stray loss as a function of frequency (HV-TV)



A javítás utáni HGA eredmények napjainkig

| Date | O ₂ | N ₂ | CO ₂ | CO | H ₂ | CH ₄ | C ₂ H ₂ | C ₂ H ₄ | C ₂ H ₆ | C ₃ H ₆ | C ₃ H ₈ | TDCG |
|-----------|----------------|----------------|-----------------|----|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------|
| 14 Nov 18 | 3275 | 4623 | 73 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| 5 Dec 18 | 26855 | 58407 | 369 | 2 | 2 | 6 | 0 | 39 | 5 | 49 | 3 | 106 |
| 20 Feb 19 | 4104 | 17099 | 249 | 17 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 19 |
| 30 Jul 19 | 1690 | 9436 | 458 | 44 | 2 | 2 | 0 | 2 | 0 | 1 | 0 | 51 |

A javítás utáni és napjainkig tartó HGA eredmények azt mutatják, hogy a hibagázanalízis alapján normál szigetelési állapot áll fent.

Konklúziók



A helyszíni mérések azt mutatják, hogy az **FRSL technika egy hatékony megelőző, és karbantartási eszköz,**

A mérési eljárásra **elég nagy alállomási igény mutatkozik**, mert ha **más módszerekkel együtt** használjuk, akkor **pontosabb diagnózist kapunk** a trafó tekercs állapotáról.

Az **FRSL módszer lényegében** egy adott frekvenciatartományú **szórási veszteség mérés**, beleértve az 50Hz-et is.

A módszer **magába foglalja** a hagyományos **impedancia változásra alapuló diagnosztikát is**, mivel impedanciamérésre is sor kerül.

Az **örvényáram veszteség mérésével detektálható a tekercs vezetékek paralel szálai közötti rövidzárlat**. Ugyancsak lehetővé válik a vezetékekben a szálak folyamatos felcserélődésének minősége ellenőrzése (CTC). Általában, **az FRSL mérés képes detektálni az olyan hibákat, amely örvényáram veszteséget okoz.**

**Köszönöm a
figyelmet!**



Felhasznált szakirodalom:

- 1. L. BOLDUC, P. PICHER, G. PARÉ, R.J: DEMERS and BÉLANGER „Detection of Transformer Winding Displacement by the Frequency Response of Stray Losses (FRSL), CIGRE 12/33-02, Cigre Session 2000**
- 2. Cigre Session 2020: D1-118: Field Experience in Oil-filled Power Transformers Fault Diagnosis by Frequency Response of Stray losses (FRSL): Pongpon SINGKHWAT, Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT), Thailand**
- 3. Cigre Technical Brochure (TB) 445, Guide for Transformer Maintenance”, Final Report of Cigre Working Group A2.34 (convenor C. Rajotte), Feb. 2011**
- 4. P Picher, C Rajotte, "Comparison of FRA and FRSL Measurements for the Detection of Transformer Winding Displacement", CIGRE SC A2 Colloquium, June 2003, Merida**
- 5. Jill Duplessis „Frtequency response of stray lossess in transformers”, MEGGER, 2015.**

Aa

Az eredmények azt mutatják, hogy a **T2A jelű trafó FRSL és FRA görbéi jelentősen különböznek a másik két trafó görbéitől.**

Vizsgálva a görbéket az volt megállapítható, hogy igazolni látszik a 14 évvel megelőző tekercs csere, amelyet egy belső zárlat miatt tettek.

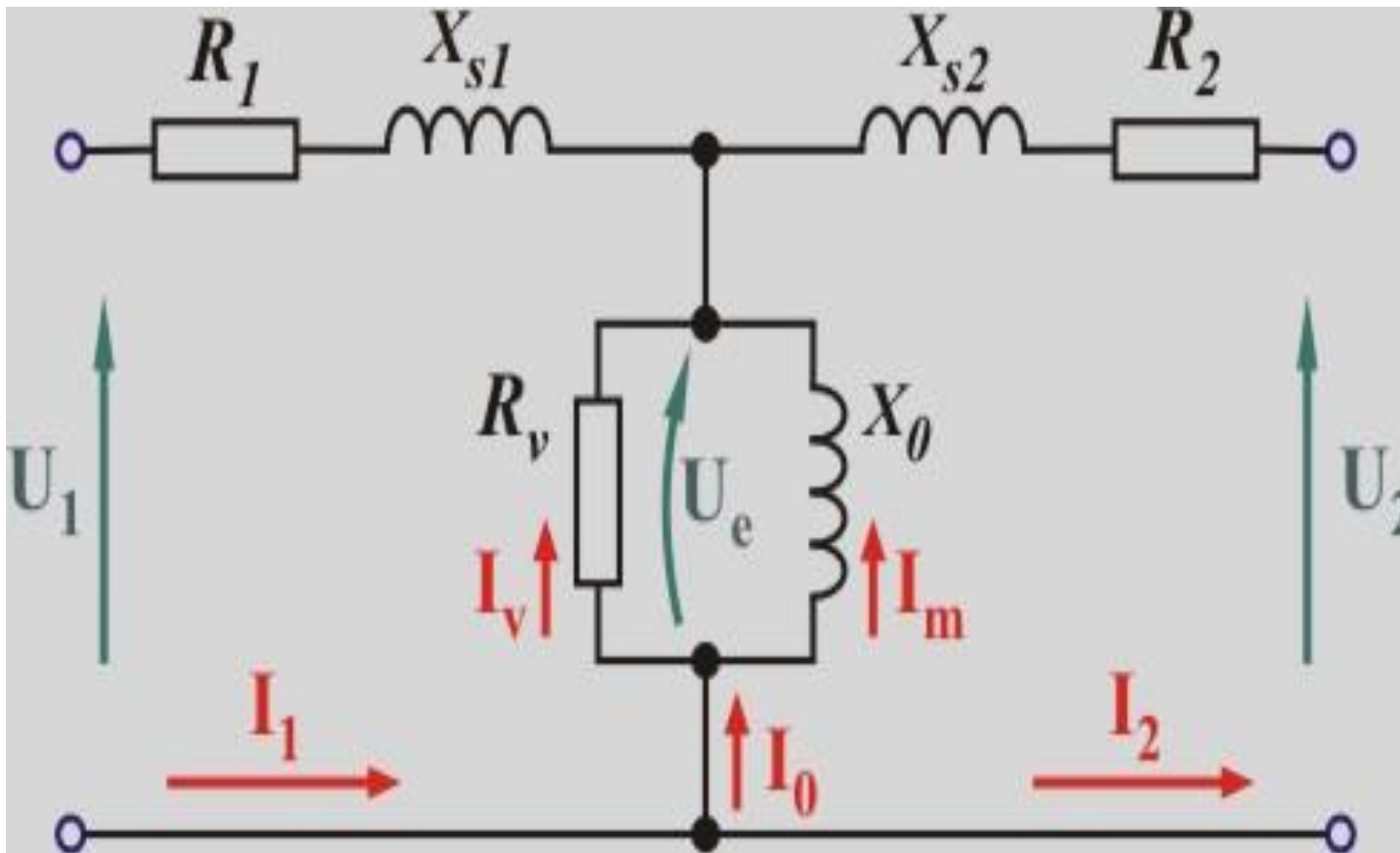
Valóban, a T2A adattábláján meg lett jegyezve, hogy **az impedancia 3,7%-al nagyobb mint a T3B és T2C esetében.**

Ebben az esetben a **T2A trafón az FRA** mérés nem hasonlítható össze a hasonló típusú trafókkal, az eltérő tekercs miatt és a referencia eredmények hiánya miatt.

Konklúziók

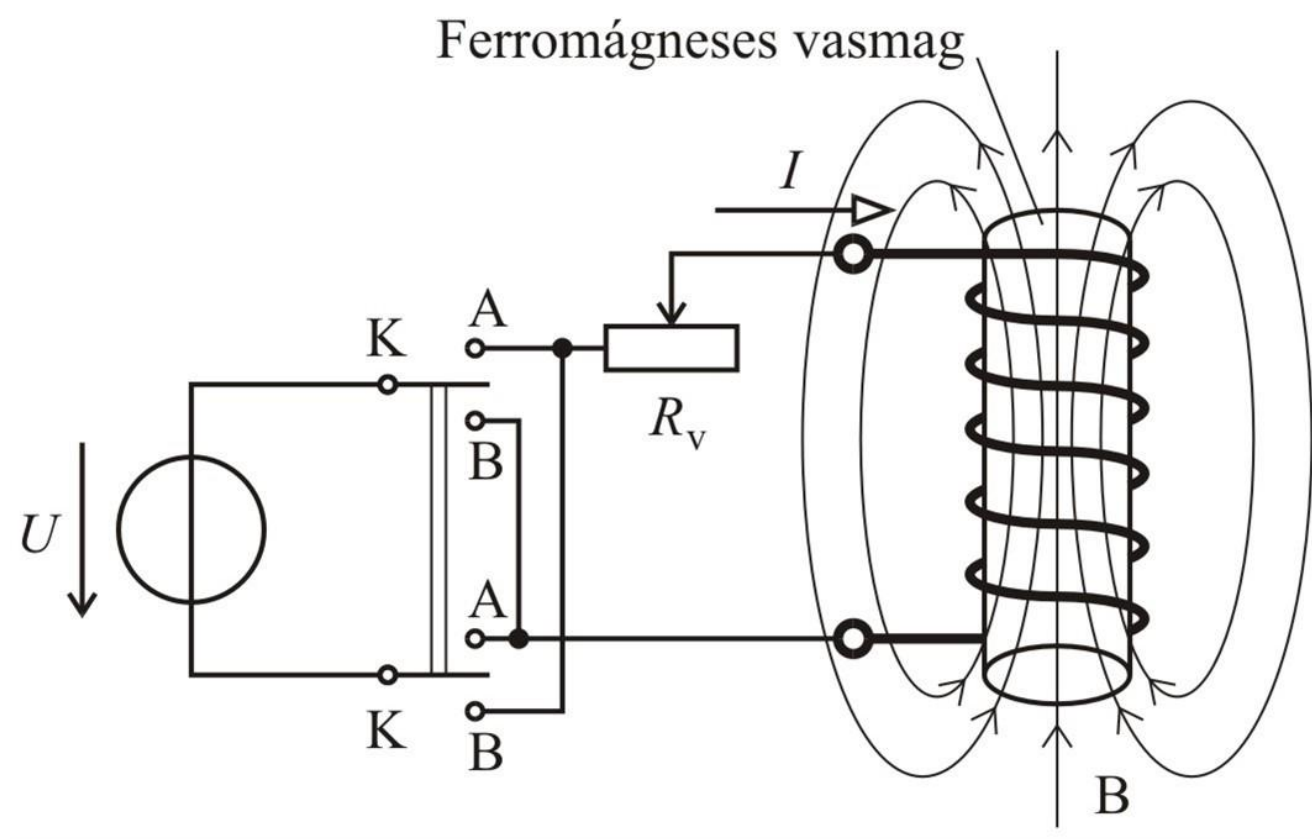
Számításokat könnyítő helyettesítő kapcsolás:

R_v : vasveszteséget képviselő fiktív ellenállás, amelyen a keletkező wattos veszteség megegyezik a vasveszteséggel.



Ha egy ferromágnesest váltakozó árammal mágnesezünk, a **mágneses fluxus periódikusan változik és a vezetőben feszültség indukálódik**. Mivel ez a feszültség zárt pályára talál, ennek mentén áramot indít.

A vasmagban indukálódó feszültség által keltett áramok veszteséget okoznak, ezeket **örvényáramú veszteségnek** nevezik, mivel az áramok örvényekként veszik körbe a vasmagban váltakozó fluxust.



Hálós CTC alapú tekercs



A feszültséget a trafó kapcsain kell mérni. Ha az áramot a **wattmérőbe épített sönttel mérjük**, akkor figyelembe kell venni a feszültségjel mérőkábelben történő **terjedését** (kb. 3ns/m), mert hibát okozhat a wattos teljesítmény mérésnél, **mert késik a feszültségjel az áramjelhez képest.**

Például **600Hz-es** mérésnél, **10m-es kábel esetén** ha 1,1%-os hiba adódik 1%-os teljesítménytényezőhöz, akkor hiba **5kHz-en kb. 9,4%**. Emiatt fontos, hogy **minél rövidebb kábelt használjunk a kapocsfeszültség mérésére.** Összehasonlító eredmény kapása céljából ajánlott mindig **ugyanazt a kábelt használni.**

A **rövidre záró kábel minősége is fontos**, amikor **átszámítjuk az egyenértékű ellenállást** a primer oldalra (**n** az áttétel).

Az **alábbi egyenletből látható**, hogyan járul hozzá a rövidzárra használt kábel **ellenállása** a teljes egyenértékű ellenálláshoz, ahogy a **primer oldalra átszámítjuk (n az áttétel):**

$$R_{tot} = R_{primary} + n^2 (R_{secondary} + R_{short-circuit})$$

Meg kell jegyezni, hogy a **vezetőt a szekunder áramnak megfelelően kell megválasztani, amely „n”-szer nagyobb, mint a primer áram.**

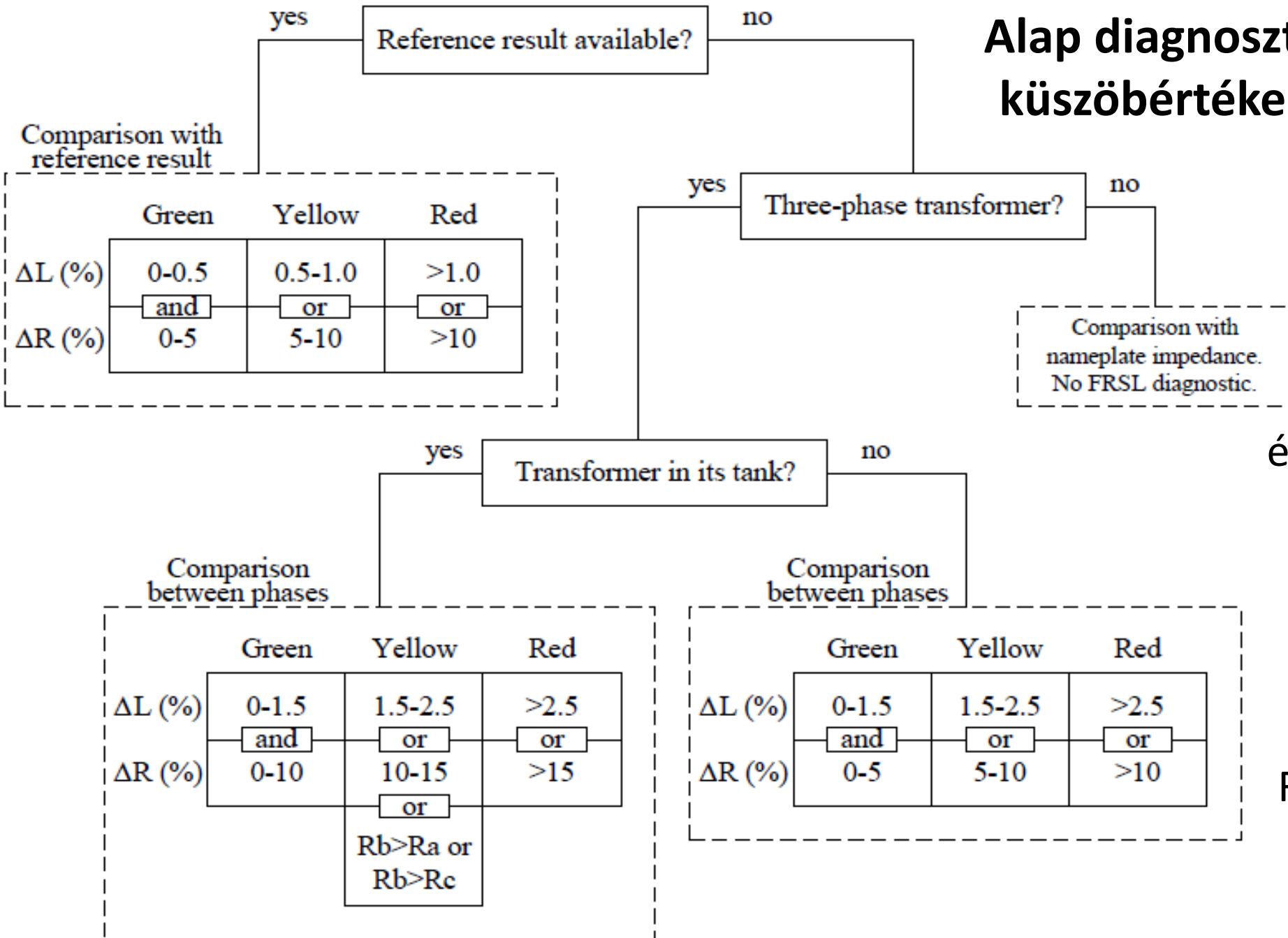
A rövidzárásra használt kábelnek nagyon jó minőségűnek kell lennie, ugyanolyan hosszú mindhárom fázis esetén, és kis ellenállásúnak a fázistekercsek ellenállásához képest.

Érdemes megjegyezni, hogy a **Megger SFRA** mérőberendezése automatikusan elvégzi a **FRSL mérést is.**

A vezetőben megjelenő járulékos veszteségeket **a szórási fluxus által indukált feszültség okozza.** Az indukált feszültség **okozza az áramot,** amelynek nagyságát **az anyag ellenállása korlátozza. Növekvő hőmérséklettel** az anyag ellenállása növekszik, az indukált feszültség miatti áram csökken, következésképpen **a veszteség is csökken.**

Ez az **ellenkezője ami történik a rezisztív veszteség esetén,** amelyet nem az indukált feszültség okoz, hanem **az az áram, amelynek értékét a tényleges terhelés határoz meg.**

Alap diagnosztikai kritériumok és küszöbértékek FRSL méréseknél



Vannak referencia értékek, összehasonlítás referencia értékekkel, háromfázisú trafó, összehasonlítás adattáblás impedanciával. Nincs FRSL diagnosztika, trafó tartályban van, fázisok közötti összehasonlítás

Referencia adatokkal történő összehasonlítás

Comparison with
reference result

| | Green | Yellow | Red |
|----------------|-------|---------|------|
| ΔL (%) | 0-0.5 | 0.5-1.0 | >1.0 |
| | and | or | or |
| ΔR (%) | 0-5 | 5-10 | >10 |

Fázisok közötti összehasonlítás

yes

Transformer in its tank?

no

Comparison
between phases

Green

Yellow

Red

ΔL (%)

0-1.5

1.5-2.5

>2.5

and

or

or

ΔR (%)

0-10

10-15

>15

or

$R_b > R_a$ or
 $R_b > R_c$

Comparison
between phases

Green

Yellow

Red

ΔL (%)

0-1.5

1.5-2.5

>2.5

and

or

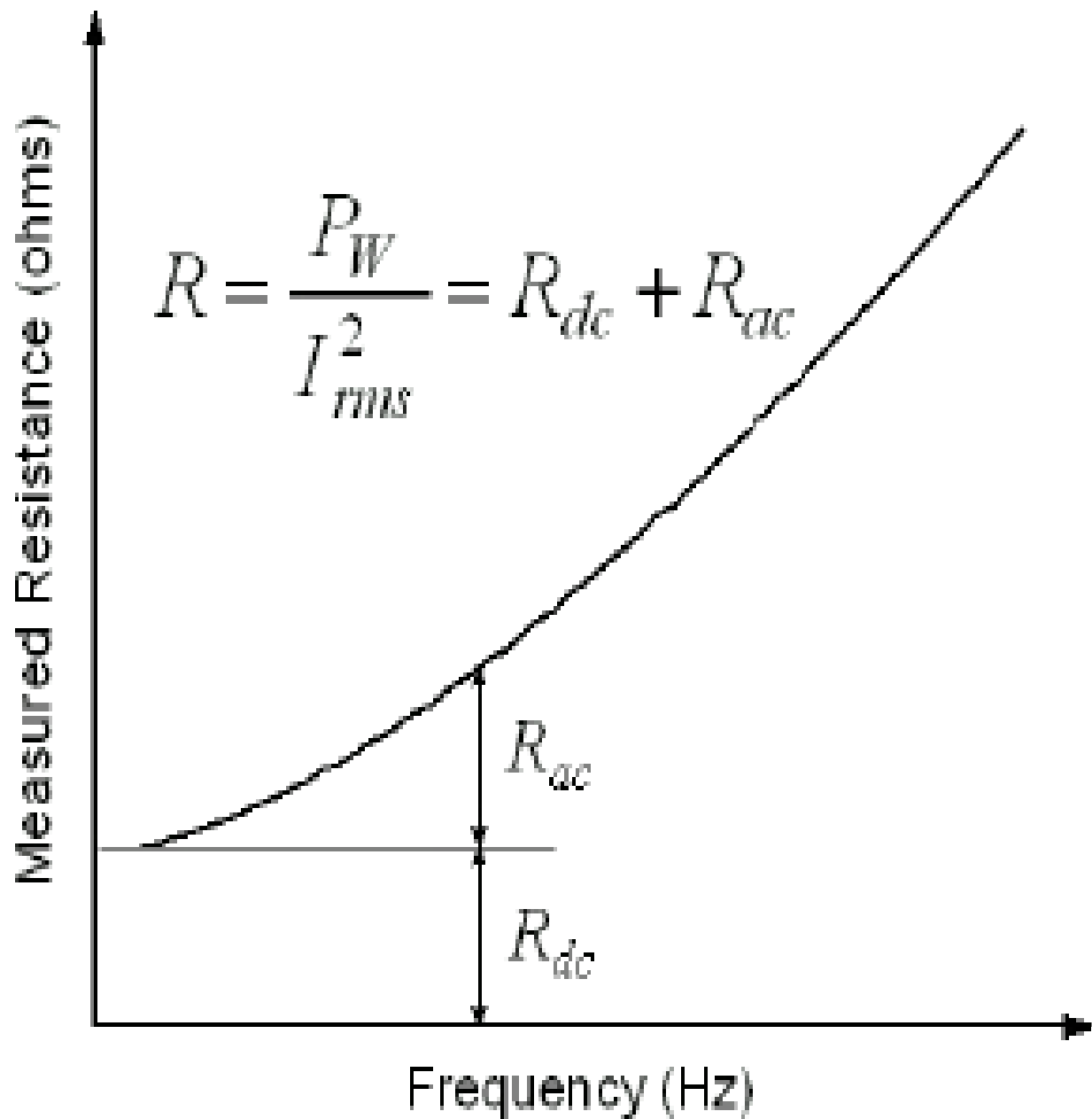
or

ΔR (%)

0-5

5-10

>10



FRSL eredmények a trafó örvényáramú veszteségét és a ennek a frekvencia függését tükrözik.

Bármilyen trafó probléma, amely örvényáram veszteség növekedéssel jár, jól detektálható lesz nagyobb frekvencián.

Az FRSL tesztet a mérő berendezéstől függően **15-400Hz, vagy 1-500Hz** frekvencián végzik.

A **nagyfrekvencián** végzett teszt a **fontos**, ott a **szkinhatás legdőntőbb**, ahol az AC-hez köthető ellenállás **nagyobb részt képvisel az ellenállás mérésében**.