

Trafó tekercs impedancia frekvenciafüggésének diagnosztikája, különös tekintettel az FRA indexes kínai FRA szabvány szerinti vizsgálatokra

Csépes Gusztáv, *Diagnostics Kft.*

gcsepes@diagnostics.hu

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

Tartalomjegyzék

- 1. A téma aktualitása, CIGRE TB 812 megjelenésének hatása**
- 2. Alapvető fizikai jelenségek rövid áttekintése**
- 3. FRA algoritmusok, indexes kínai FRA kiértékelés**
- 4. Konklúziók**

A téma aktualitása

Újdonságok a CIGRE utolsó összefoglaló kiadványában: CIGRE TB 812 (2020)

-Korábbi kiadvány (TB 342 (2008), 2020-ban került kiadásra: TB 812 (2020),

Mechanical-condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA).

-Rendelkezésre állt még három szabvány:

-IEC 60076-18: 2012: Measurement of frequency response:

-IEEE PC57.149-2012: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers:

-Kínai: Std. DL/T911-2004 (2016), ICS 27.100, F24, Document No. 15182-2005, June 2005. (correlation factors, co-variance of spectra). The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China, "Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers".

Milyen újdonságok találhatóak a 2020-as TB 812-es kiadványban?

- Az FRA-t befolyásoló tényezők **jobb megismerése**,
- Érdekes „**esettanulmányok**” összegyűjtése, szimulációk,
- Az FRA „**mennyiségi kiértékelések**” szakirodalom áttekintése,
- Numerikus indexek** az FRA kiértékelésre, ajánlások.

A WG tagjai összesen **60 „esettanulmányt”** gyűjtöttek be, abból **18-at közzé is tettek.**

A példákból láthatóak, hogy **különböző hiba típusokál** melyik **frekvenciatartomány a domináns.**

A **viszonylag kevés esettanulmány** alapján az mondható, hogy kevés az **FRA-ás tapasztalat**, ahol egyértelmű **kapcsolat lenne a mechanikai hiba és FRA között.**

Egy **bizonyos mértékű** tekercselmozdulás miatt a trafó **tovább üzemelhet**, így a „**gyenge állapot**” a vizsgálatok hiánya miatt **rejtve marad.**

A kevés hozzáférhető, igazi esettanulmányok hiánya miatt, kutatóintézetek próbálják szimulálni a hibákat, hogy javítsák az FRA kiértékelések jóságát.

Az újabb eredmények egyrészt a modellmérésekből, másrészt számítógépes szimulációkból adódnak.

Számos koncentrált elemes, vagy megosztott paraméteres modellek léteznek a szakirodalomban a probléma megoldására.

De a probléma még marad: milyen a korreláció az igazi trafós esetekkel.

Ez egyrészt annak tudható be, hogy általában többszörös hibák szoktak előfordulni, amikor egy tekercs megsérül.

Ha a tekercs elmozdul, menetzárlat követheti, amelyet hagyományos tesztekkel is követhetünk, amelyet szétbontás követ.

A szétbontás költséges eljárás, ritkán alkalmazzák, így az igazi esettanulmányok számára nem állnak rendelkezésre.

A **TB 812 azzal járul hozzá az FRA kiértékelés jobbításához**, hogy összegyűjtött több ipari és kutatóintézeti tapasztalatot, és ezekre alapozva néhány mérőszám került kidolgozásra, amelyek eléggé biztatóak az FRA kiértékelések fejlődésben.

A TB 812 **természetesen felfrissítette** az alapok és tapasztalatok áttekintését, különös tekintettel az FRA méréseket befolyásoló tényezőkre, a minél pontosabb mérésre.

A TB 812 végkövetkeztetései az alábbiak voltak:

- Az FRA kiértékelés alapja, hogy megismerjük a frekvenciaválaszt és a mérést befolyásoló tényezőket.
- A bemutatott esettanulmányok jó referenciaként használhatók az FRA által detektálható tekercs elmozdulásoknál.
- A kutatóintézeti tanulmányok laboratóriumi modellmérésekkel és számítógépes vizsgálatokkal egészítik ki a korlátozott számú esettanulmányokat.
- A kutatóintézeti eredményekre és a kiválasztott esettanulmányokra alapozva, néhány mérőszám került bevezetésre, ami a legbiztatóbb a jövő kutatásaira nézve.

A WG ajánlái az alábbiak voltak még:

- A CIGRE **legyen fóruma az esettanulmányok** gyűjtésének és az FRA kiértékelései eredmények érdeklődők felé történő megosztására.
- **A trafós társadalom használja a legbiztatóbb mérőszámokat az FRA kiértékelés fejlesztésére.**
- **A kutatóintézetek folytassák a az FRA kiértékelés támogatását.**

Röviden az (S)FRA technikáról

- A trafók üzembiztos működésénél a szigetelési jellemzőkön kívül jelentős szerepe van **aktív rész mechanikai állapotának** is.
- A **mágneses erőhatások** lépnek fel a **tekercsekben**, valamint a **vasmagban**, így az **aktív rész pillanatnyi mechanikai állapotát** e két komponens állapota határozza meg.
- Üzem közben a **leszorító erő csökken**, okai: öregedés miatti szigetelés roskadás, szállítás, ismétlődő termikus ciklusok, **rövidzárlati és kapcsolási áramlökések, állandó üzemi rezgések**, stb. (után húzás).
- **A tekercsek „rövidülését”** a tekercselés betétezésének és papírszigetelésének az állandó leszorító erő és az öregedés miatti **roskadása váltja** ki, amely hosszabb üzemidő után elkerülhetetlen.

A tekercsek roskadása két problémát okoz: Egyrészt a gyártáskor beállított tekercsközepek elmozdulnak a középvonalból, másrészt a tekercsek szorítása fellazul.

- Az üzemben fellépő erőhatások és rezgések **nemcsak** a tekercset, **de a vasmagot is lazítják**.
- A transzformátor tekercs ill. vasmag leszorító erőinek csökkenése az üzemelő trafóban hibát okozhat azáltal, hogy **csökken a külső/belső zárlatokkal szembeni ellenálló képessége**.

Mechanikai állapotellenőrzésre a három legfontosabb diagnosztika:

- **Rezgésmérés:** tekercs, leszorító szerkezetek, vasmag rezgése átadódik az olajnak, így az olaj rezgésének vizsgálatával ellenőrizhetjük a trafó technikai állapotát. A tekercsek mechanikai állapota rezgéssel való vizsgálata történhet offline és online, a trafó falon vagy közvetlenül olajon keresztül. A kiértékelés lényegében referenciával történő összehasonlítás, így az **online** módon történő vizsgálat **jobb** eredményt ad.
- **FRSL (Frequency Response of Stray Losses):** 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**. Tapasztalat, hogy ha a HGA „túlmelegedés, ív” hiba esetén más hagyományos mérések még normál állapotot jeleznek, amikor az FRSL hasznos jelzést ad, vagyis FRSL diagnosztikával **beazonosítható a tekercshiba**.
- A legfontosabb mechanikai állapotellenőrzés az FRA, amelyre szabványok is léteznek, amely lényegében „**tekercs impedancia frekvenciafüggése**”.

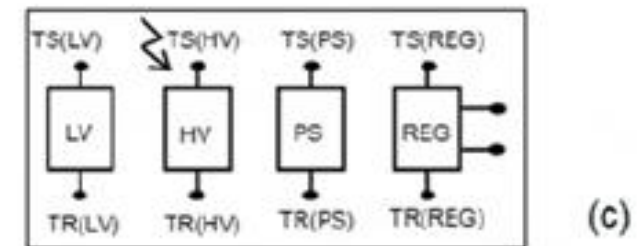
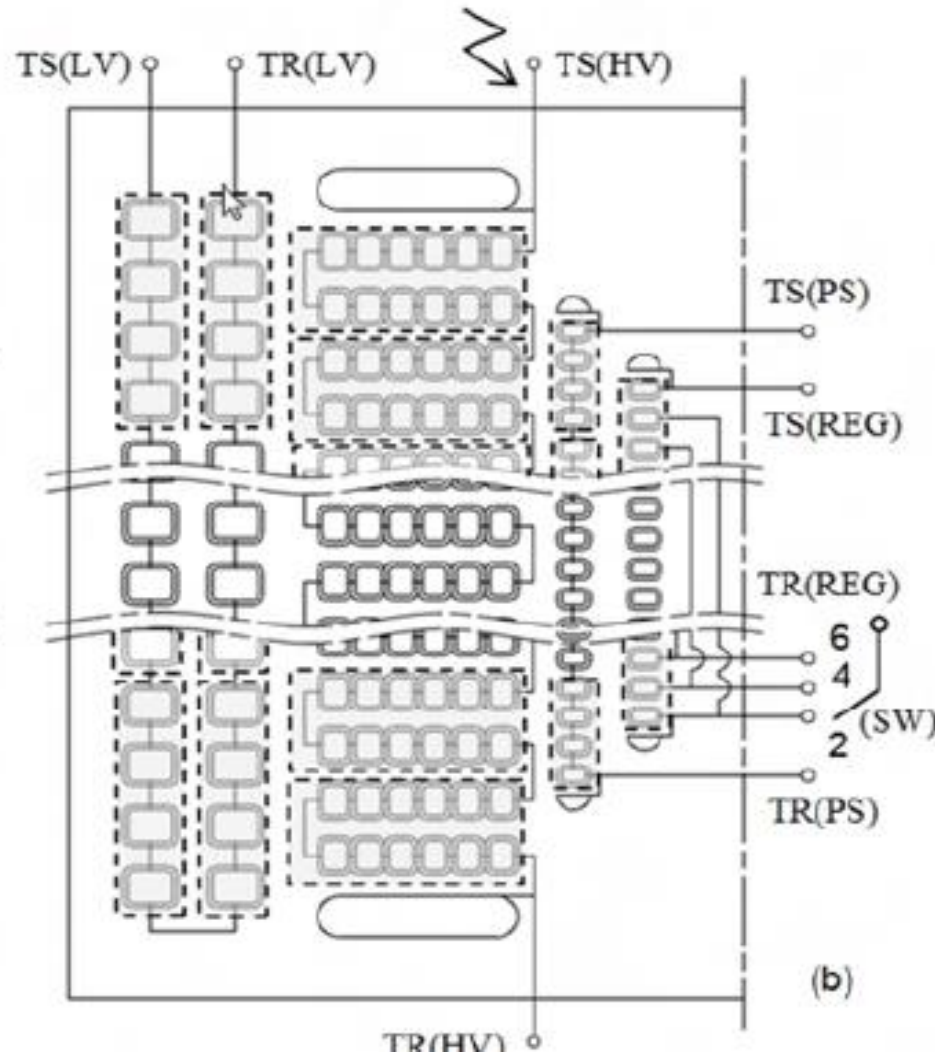
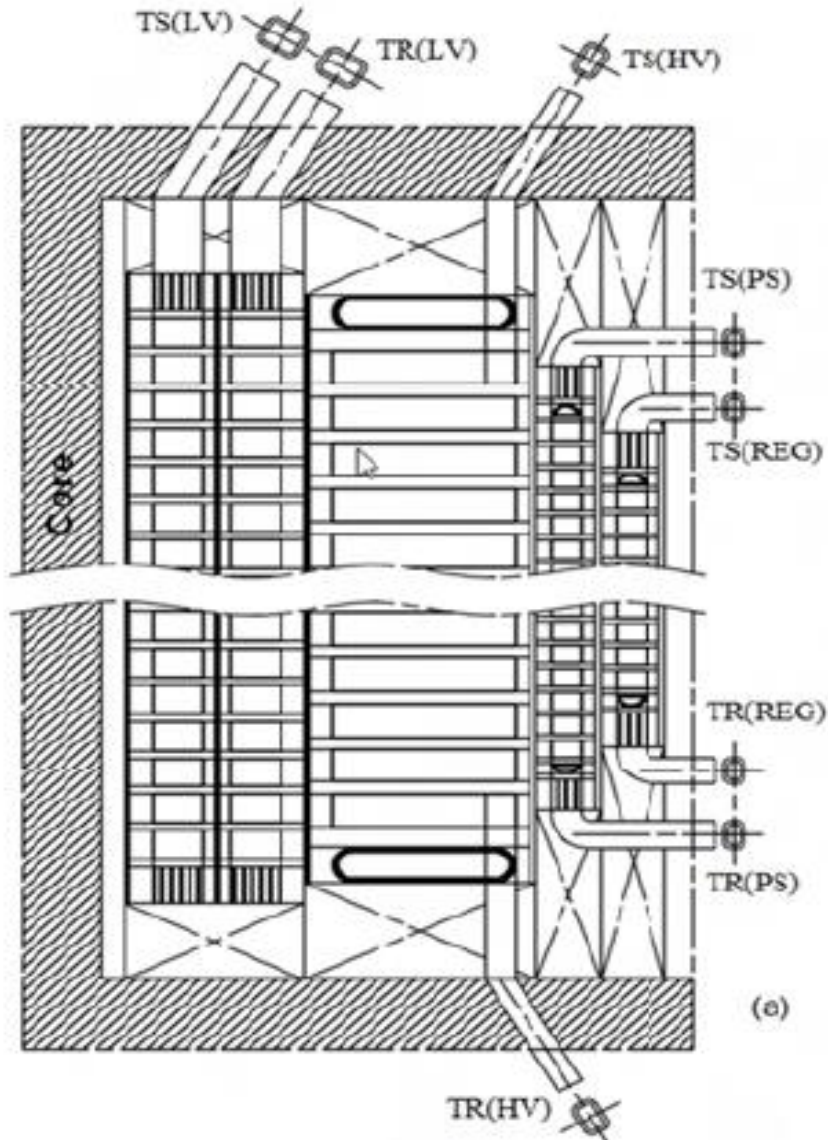
(S)FRA mérések alapjai

- **CIGRÉ dokumentumok: TB 342 (2008), TB 812 (2020)**
- **IEC 60076-18: 2012 szabvány,**
- **IEEE Std C57.149-2012**

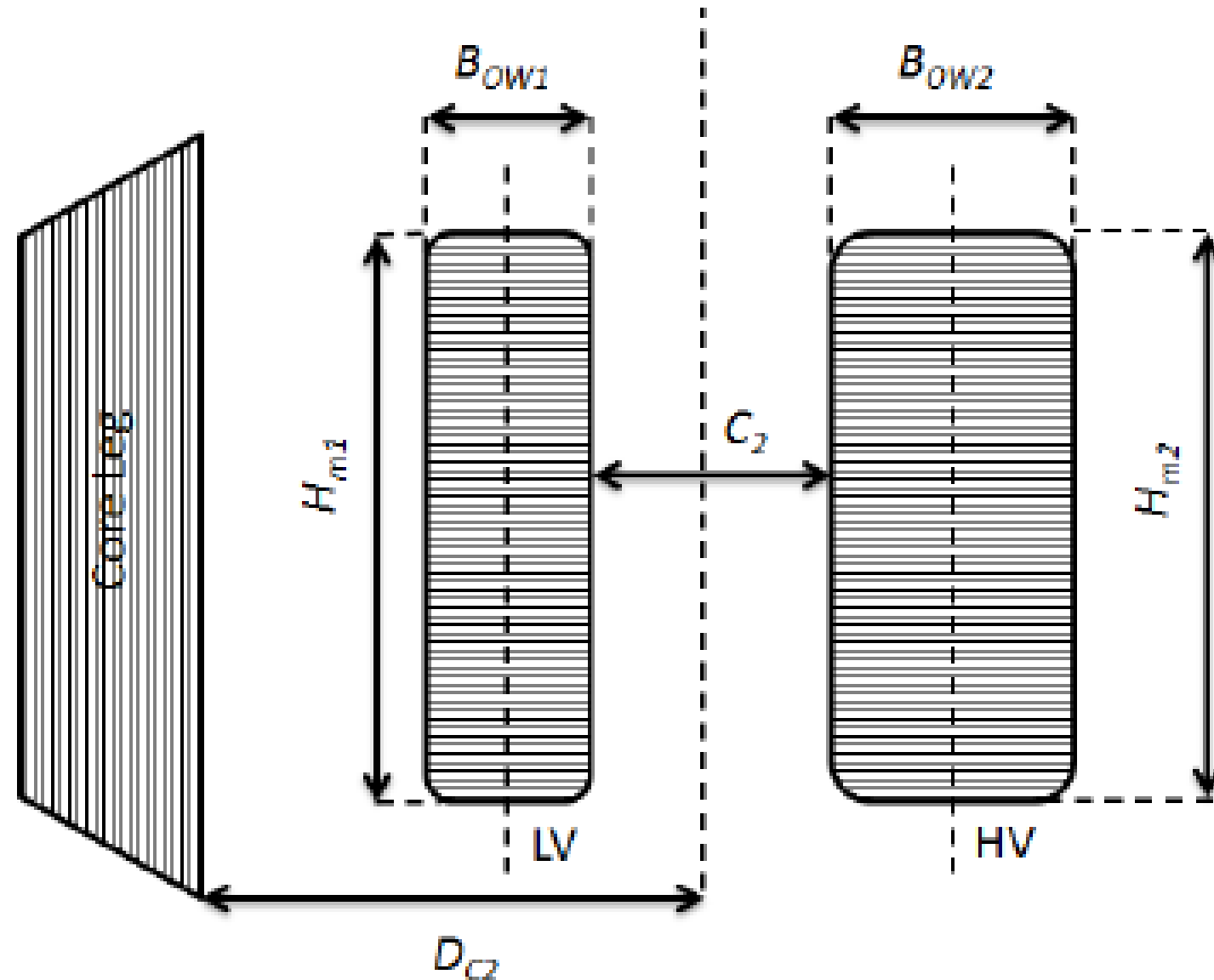
- **Az FRA mérés célja:** nagy mechanikai erők, öregedés okozta tekercs rövidülések, ill. egyéb tekercs deformációk, geometriai torzulások, OLTC hiba, stb. detektálása. Különös fontos közeli zárlatok utáni ellenőrzés, amellyel megelőzhető egy katasztrofális meghibásodás.
- Mi az alapja az FRA módszernek? A geometriai változás következtében (tekercselmozdulás, de még vasmag zárlat, földelő és árnyékolási hibák miatt is) változnak a „C” és a „L” értékei, ezért lényegében a maradandó geometriai változás megállapítására szolgál.
- **Az FRA mérés célja:** „L” és „C” változásán keresztül tekercs geometriai torzulására tudunk visszakövetkeztetni, a tekercs impedancia frekvencia függésén keresztül.
- **A tekercs deformációk, geometriai torzulások detektálása,** különösen fontos a közeli zárlatok után.
- De növekvő érdeklődés az FRA spektrumért: közeli zárlat, „rázást és ütést” okozó szállítás után, de újabban a trafó és a hálózat kölcsönhatásából létrejövő romboló hatású belső rezonanciás túlfeszültség vizsgálata miatt is.

A vizsgálandó trafó egy fázisának áttekintő vázlata:

Geometriai vázlat - Villamos ábrázolás - Szimbolikus ábrázolás



Egy két tekercses, egyfázisú trafó sematikus ábrája a tekercsek méreteivel

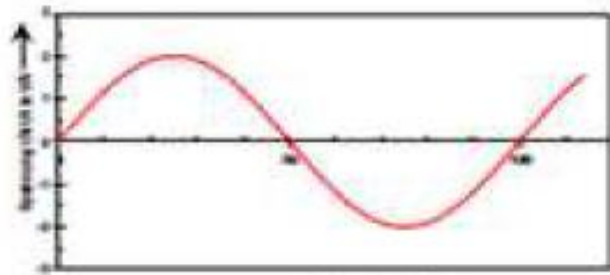


Irányelvek, szabványok, stb. az SFRA mérések végrehajtására

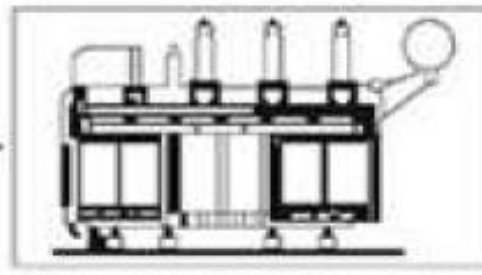
- CIGRE TB 342 (2008),TB 812 (2020)**: Mechanical-condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA),
- IEC 60076-18: 2012**: Measurement of frequency response
- IEEE PC57.149-2012**: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers
- **Kínai: Std. DL/T911-2004 (2016), ICS 27.100, F24, Document No. 15182-2005, June 2005.** (correlation factors, co-variance of spectra). The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China, "Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers".

A fenti dokumentumok alapján az FRA technikáról röviden az alábbiakat fontos áttekinteni:

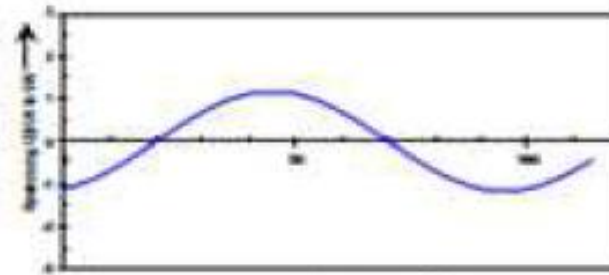
Transformer



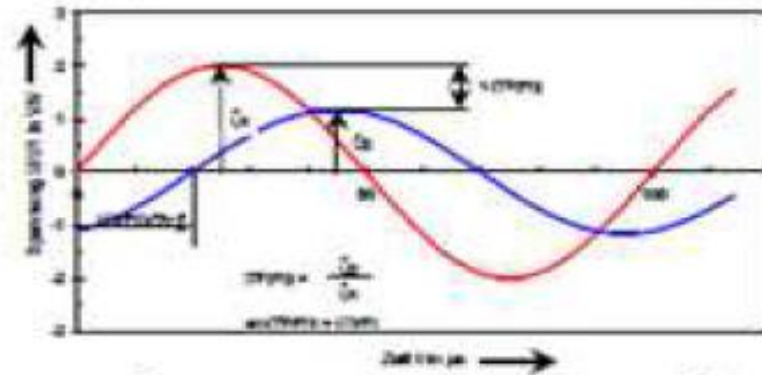
Input signal
(sine wave of
variable frequency)



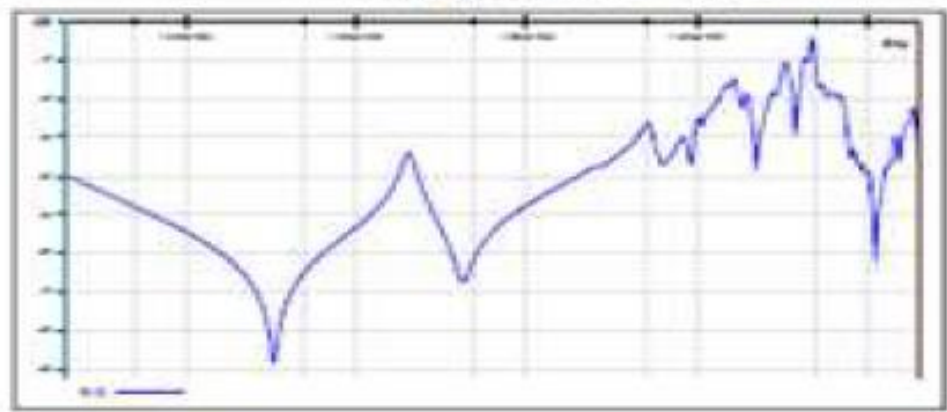
Complex RLCM network



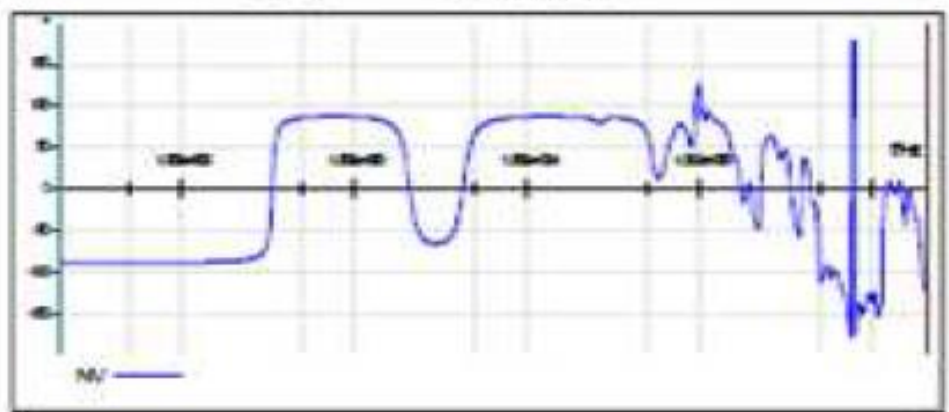
Output signal



Magnitude



Phase



FRA mérés általános
elvé

Átviteli függvény

A **változó frekvenciájú szinusz hullámot** az egyik oldalra kapcsoljuk, miközben a **bemenő és választ jelet egyidejűleg rögzítjük**. A mért frekvencia, **amplitúdó (A)** és **fázisszög ϕ értékek lineáris – logaritmikus koordináta rendszerben** kerülnek rögzítésre, az alábbi definíció szerint:

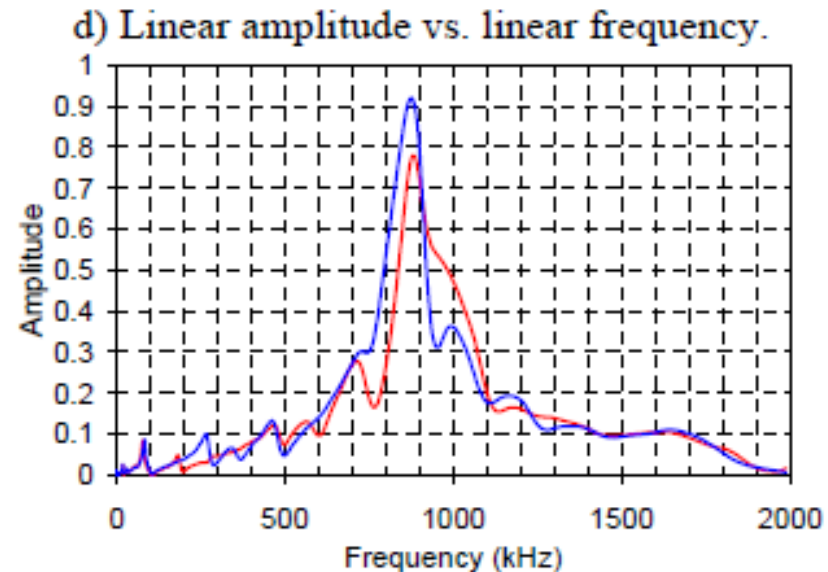
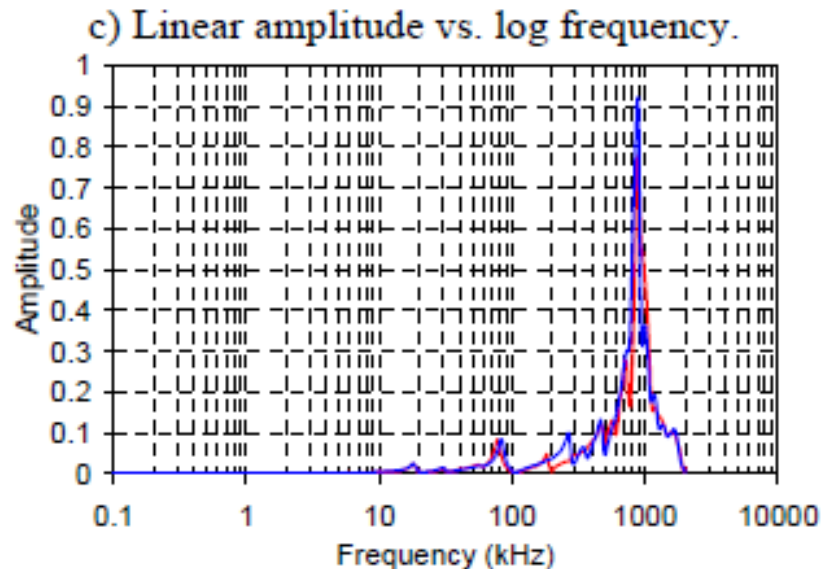
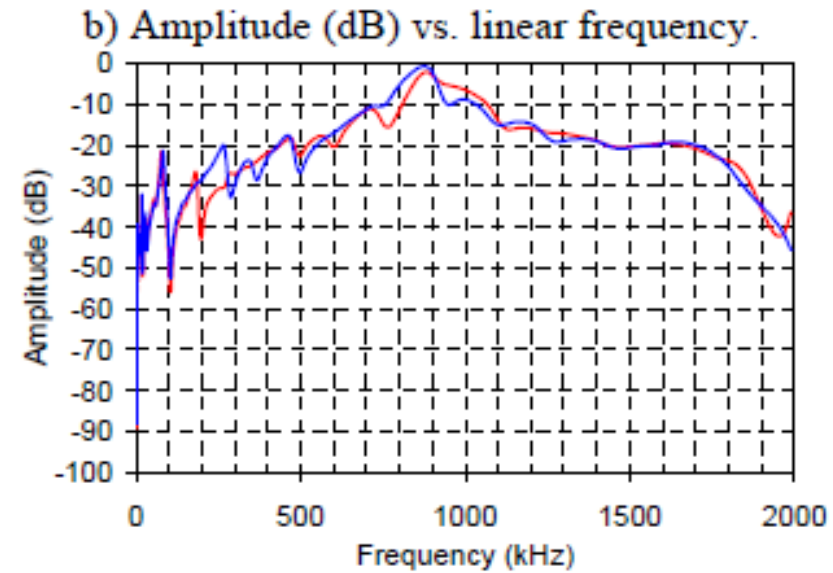
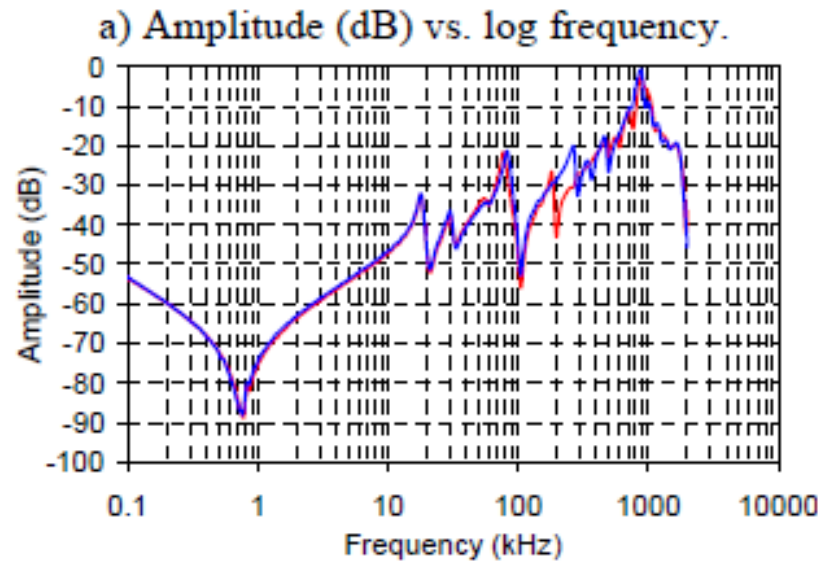
$$A = 20 \lg_{10} \left| \frac{U_1(j\omega)}{U_2(j\omega)} \right| \quad \phi = \tan^{-1} \left[\frac{U_1(j\omega)}{U_2(j\omega)} \right]$$

A tapasztalat szerint az így definiált FRA függvénygörbe pontos információt ad a **tekercs geometriai változásáról, deformációjáról**.

FRA spektrumról általában

- Az FRA mérés eredménye **két görbe**: csillapítási és fázisszög görbe.
- A **szabványok eddig csak** a csillapítási görbét használták a diagnosztikában, de a jövő valószínűleg számolnak majd a fázisszöggel is.
- Az FRA spektrum általában **három vagy négy fő tartományra** osztható, néha vannak al-tartományok is: alacsony, közép és nagyfrekvenciás tartományok.
- Ezek **határai függenek** a trafó konstrukciójától, főleg a geometriai méretektől, amelyek pedig a teljesítménytől függenek.
- Minél **nagyobb a trafó**, annál nagyobbak az induktivitások és a belső kapacitások, és így az FRA spektrumok a **kisebb frekvenciák felé tolódnak**.
- Trafóhibák több mint negyede tekercs deformációval jár**. A tekercsdeformáció **3 csoportba** sorolható: „csekély (slight), közepes (middling), súlyos (severity).

A spektrumok ábrázolása: log-log, log-lin, lin-log, lin-lin görbék összehasonlíthatósága



FRA kiértékelésnél az alábbi változásokat kell figyelni:

- A spektrumgörbe teljes alakja

- Rezonancia helyek száma

- Rezonancia frekvenciák eltolódása

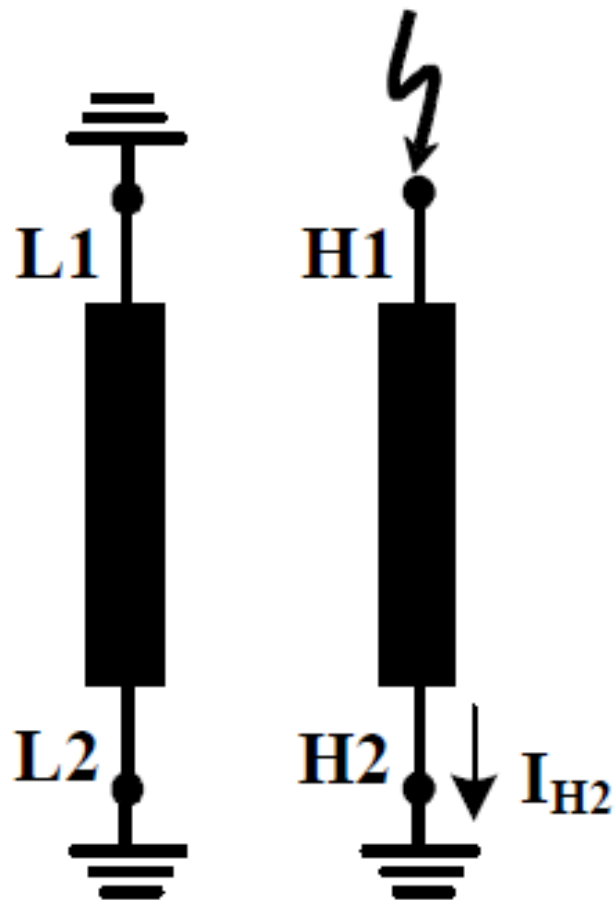
- Az FRA spektrum alapvetően a **trafó tekercs és vasmag szerkezetétől** függ, így a változás a tekercs deformáció, ill. elmozdulásból eredhet, de változhat a különböző mérési „elrendezésből” is, törekedni kell az **azonos mérési elrendezések kialakítására**.

FRA eredmények kiértékelésében fontos, hogy milyen mérési kapcsolást alkalmazunk.

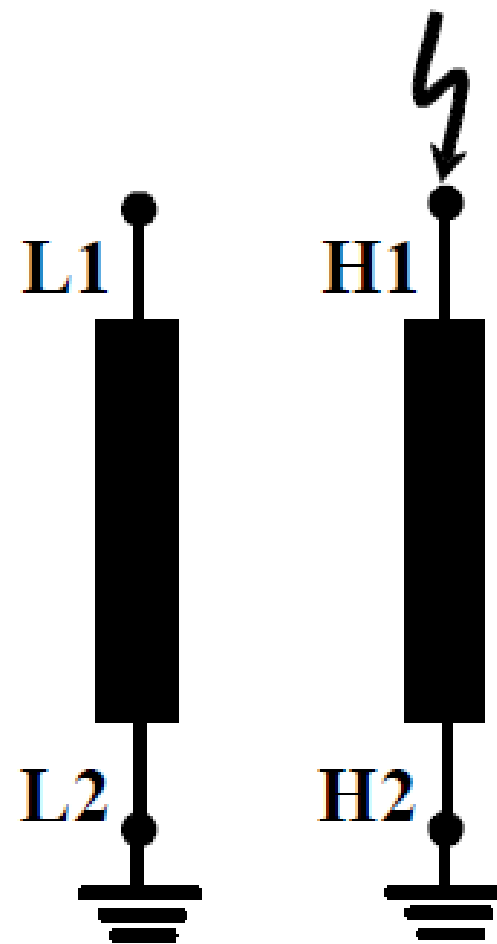
-Legtöbb felhasználó az „**end-to-end**” mérést alkalmazza, amelynél a bemenő jel az **egyik tekercsvégre kerül, a másik tekercsvégen** az „átvitt” jelet mérjük, mint egy egyszerű ellenállásmérésnél.

-Lehetséges úgy is mérni, hogy a bemenő jel megy az **egyik kapocsra (NF) és mérjük a másik tekercsre „átvitt” fesztséget**, vagy az áramot a bemenő oldalon (NF) földelési pontjában, ezáltal „ön” vagy „átviteli” impedanciát (vagy admittanciát) határozhatunk meg.

Lehetséges FRA kapcsolási módok

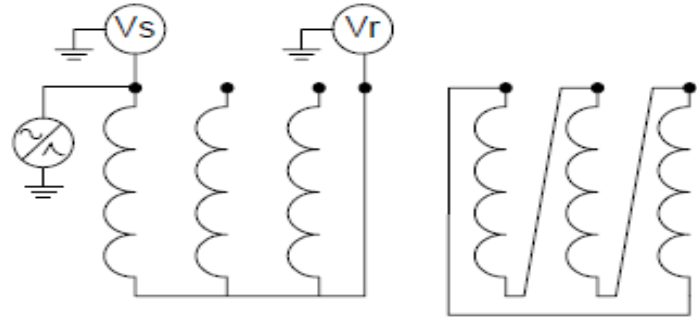


$$TF_1 = \frac{I_{H2}}{V_{H1}}$$

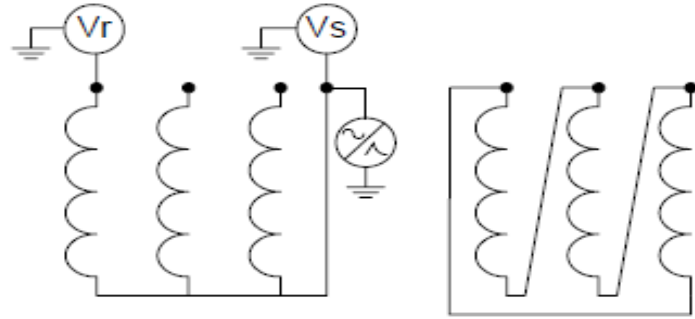


$$TF_2 = \frac{V_{L1}}{V_{H1}}$$

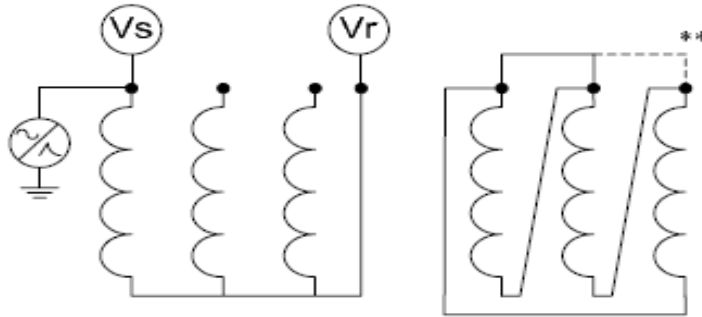
(a) End-to-end (source on phase terminal)*



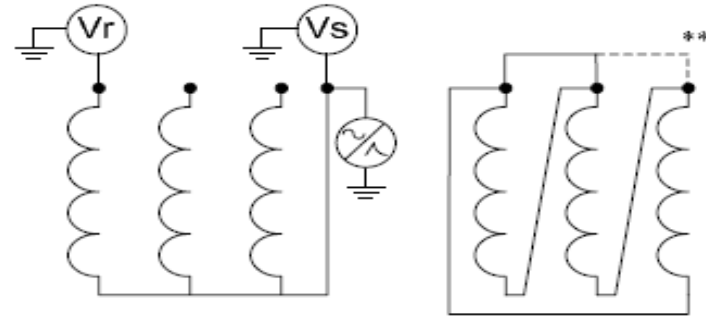
(b) End-to-end (source on neutral terminal)*



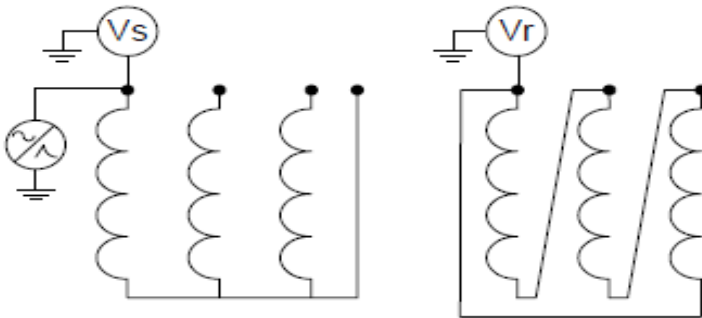
(c) End-to-end short-circuit (source on phase terminal)*



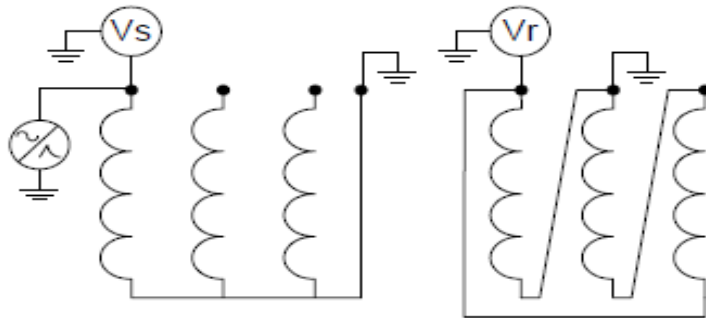
(d) End-to-end short-circuit (source on neutral terminal)*



(e) Capacitive inter-winding

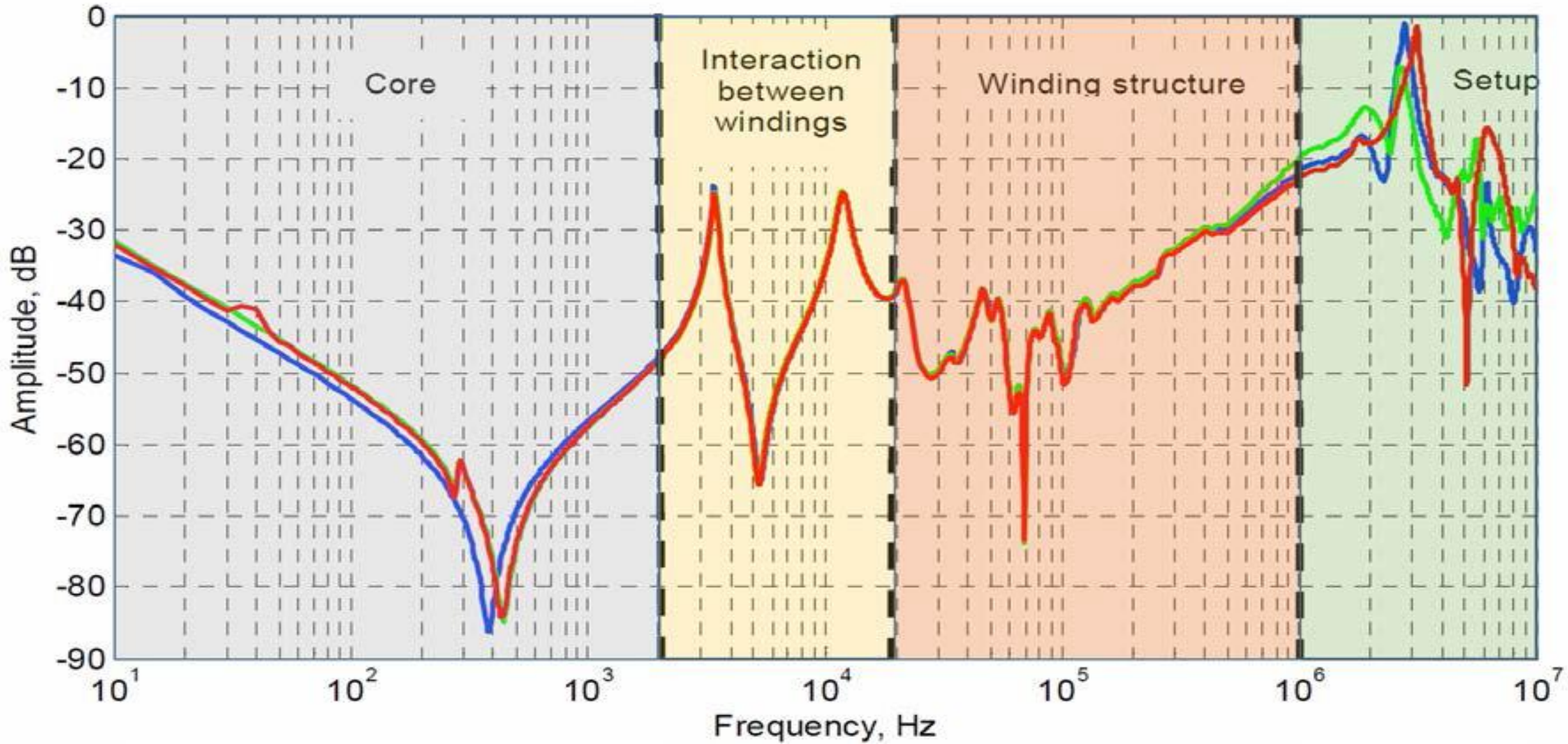


(f) Inductive inter-winding



**Néhány lehetséges FRA
mérési kapcsolás**

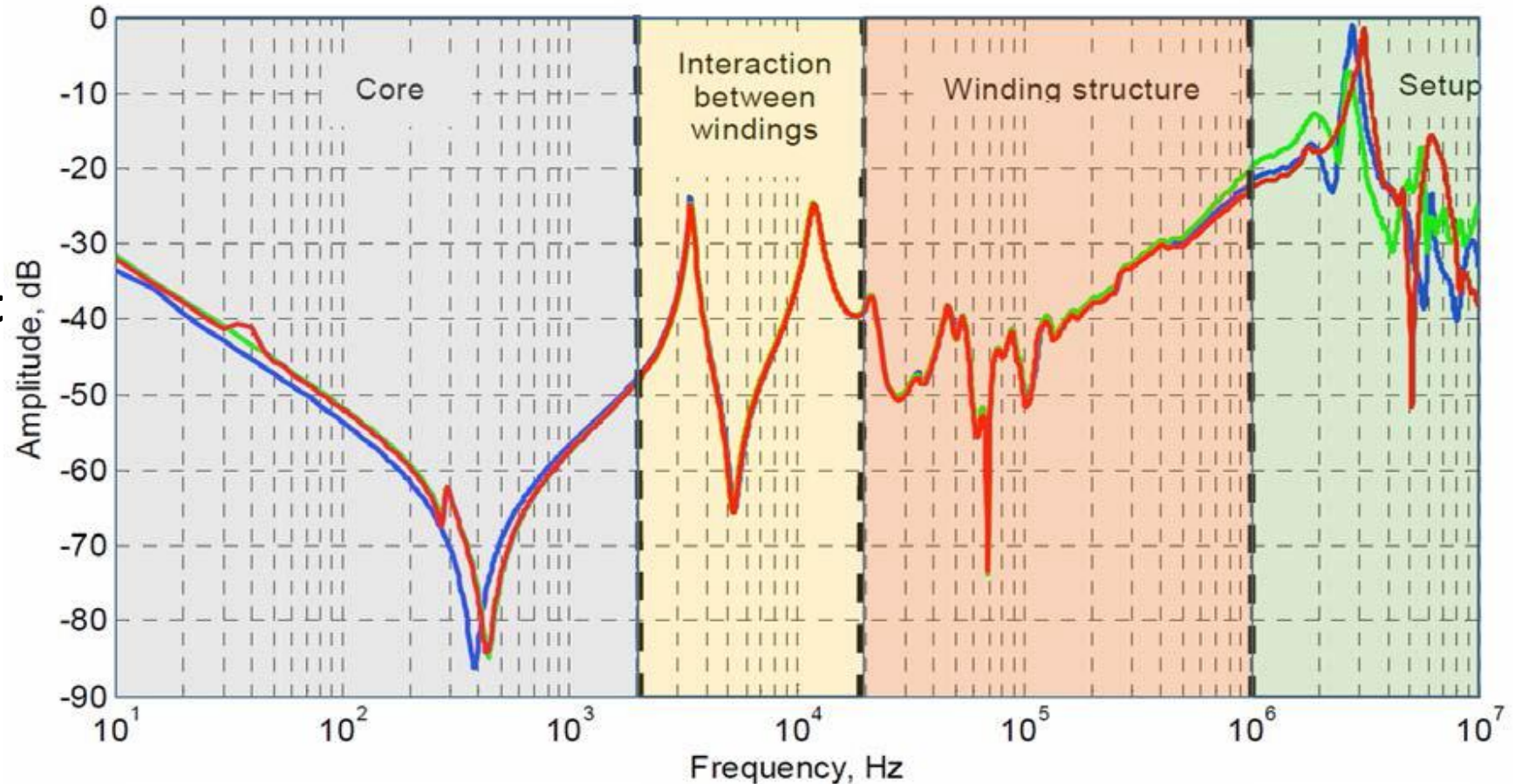
Spektrumgörbék jellegzetes szakaszai



1. Tartomány: vasmag hatása (2 kHz alatt, IEC 10 Hz-1 kHz) (lin-log)

Alacsony frekvencián (2 kHz alatt) **20dB/dekád meredekségű csökkenés**, ez a vasmag mágnesező inductívitásának a következménye. Ezután egy **minimum jelenik meg: a mágnesező inductívitás és a teljes trafó kapacitás rezonanciája**.

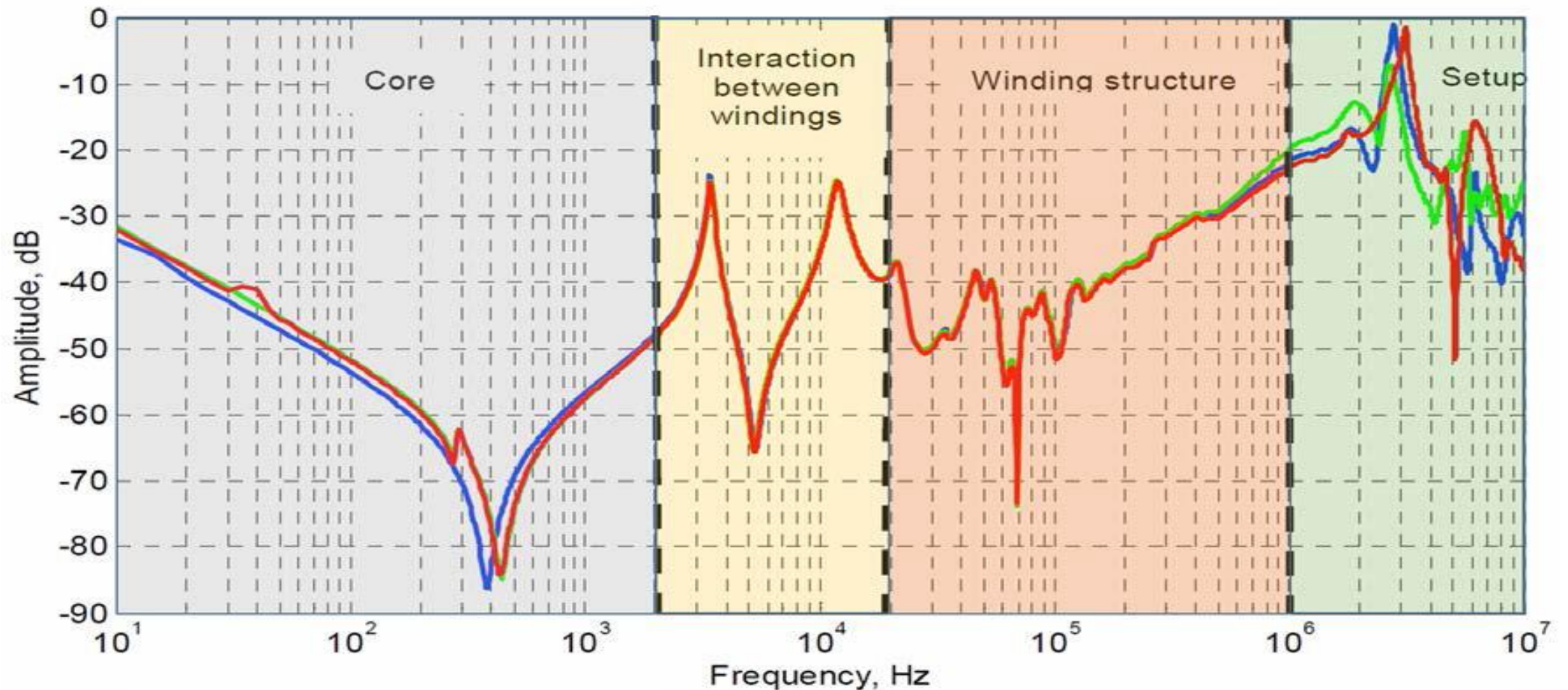
Háromfázisú, három oszlopos trafónál, a **középső fázisnál csak egy anti-rezonancia** (párhuzamos rezgőkör) látható, mert a **két szélső fázisra nézve szimmetrikus a mágneses út**. A két szélső fázisnál két ilyen rezonancia van. Ha van maradék mágnesesség (**remanencia**), akkor ezt a részt befolyásolja.



Öt oszlopos trafónál ebben a tartományban más az FRA görbe alakja.

2. Tartomány: Tekercsek közötti kölcsönhatás

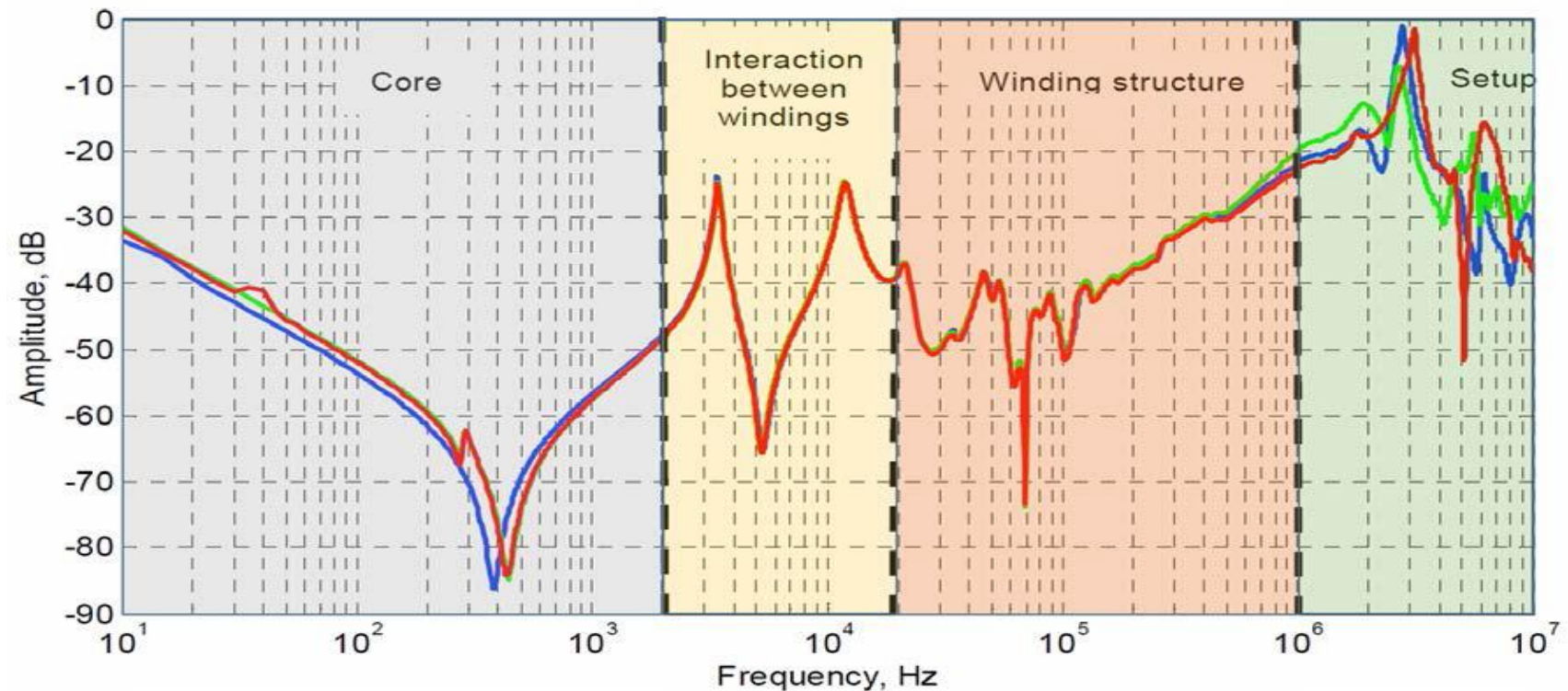
2 kHz – 20 kHz közötti spektrumot a **tekercsek közötti kölcsönhatás befolyásolja**, ami alapvetően a tekercsek elhelyezkedésétől és kapcsolódásától függ: delta kötés, autótrafó, egy vagy három fázis, stb. A 2 kHz-20 kHz-es tartományban egy autótrafó FRA spektrumának **két különálló rezonancia pontja van**.



3. Tartomány: Vizsgálható tekercs szerkezetének hatása

20 kHz - 1 (2) MHz közötti szakaszra a tekercs szerkezeti kialakításának van erős befolyása, amelyet a trafó **szórási impedanciája** határoz meg a tekercs **soros és a föld kapacitásával** együtt. A **nagyfesz tekercsnél nagy a soros kapacitás** (átlapolós vagy árnyékolt konstrukciók). Itt **kevesebb a rezonancia és az anti-rezonancia**, főleg a soros kapacitás a meghatározóbb. Itt **kapacitív emelkedő trend látható**, a NF tekercs nagy soros „C” miatt. Ugyanakkor a **kis soros „C”-jű KF tekercs általában sík amplitúdó trendet mutat amelyre számos rezonancia és anti-rezonancia szuperponálódik**.

Azt a frekvenciát, amelyen az impedancia végtelen értékű, **antirezonanciának** nevezzük, erre a legfőbb példa a **párhuzamos rezgőkör**. **Soros rezgőkörnél** egyszerűen rezonanciáról beszélünk.



FRA görbék kiértékelési lehetőségei

- Vannak a transzformátorról korábbi felvételek (**ujjlenyomat**) és az aktuális mérés eredményét a korábbihoz hasonlítjuk. Ez a legkorrektebb kiértékelés megfelelő tapasztalat felhalmozódása után a trafó konstrukció ismeretében megállapítható, hogy az elmozdulás veszélyes mértékű-e.
- Ha **nincs megelőző mérési adatunk de rendelkezésre áll hasonló típusú** transzformátoron felvett görbe akkor feltételezhetjük, hogy bizonyos tűrésen belül a két egység azonos fázisának görbéi egyformák lesznek és ez alapján értékelhetjük az eredményeket.
- Ha **sem ujjlenyomat sem hasonló transzformátor nem áll rendelkezésre** akkor a **három fázis összehasonlításával** tudunk csak próbálkozni. Általában a két szélső fázis képe közel azonos, a középsőé kissé eltérő. Sajnos bizonyos konstrukcióknál és a fokozatkapcsoló szélső állásaiban a három fázis eltérő képet ad itt az összehasonlítással óvatosan kell bánni.

Legutolsó CIGRE összefoglaló műszaki irányelv: CIGRE TB 812 (2020)

TB 812 eredmények még nem kerültek szabványosításra

Újdonságok a CIGRE utolsó összefoglaló kiadványában: CIGRE TB 812 (2020)

-Korábbi kiadvány (TB 342 (2008), 2020-ban került kiadásra: TB 812 (2020), Mechanical-condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA).

-Rendelkezésre álltak még szabványok: IEC 60076-18: 2012: Measurement of frequency response: IEEE PC57.149-2012: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers: Kínai: Std. DL/T911-2004 (2016), ICS 27.100, F24, Document No. 15182-2005, June 2005. (correlation factors, covariance of spectra). The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China, "Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers".

Milyen újdonságok találhatóak a 2020-as TB 812-es kiadványban?

-FRA alapok, FRA-t befolyásoló tényezők jobb megismerése,

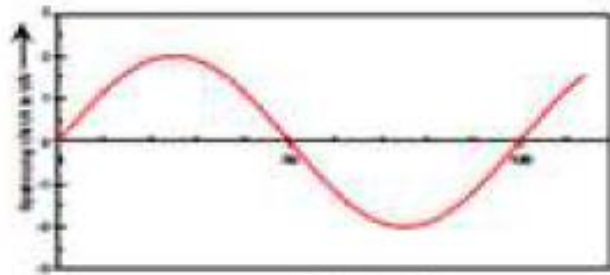
-Érdekes „esettanulmányok” összegyűjtése, szimulációk,

-Az FRA „mennyiségi kiértékelése” szakirodalom áttekintése,

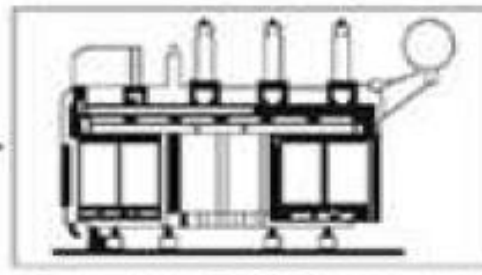
-Numerikus indexek az FRA kiértékelésre, ajánlások.

**CIGRE TB 812 új indexes FRA
kiértékelése, különös tekintettel a
KÍNAI FRA szabvány indexes
kiértékelésére**

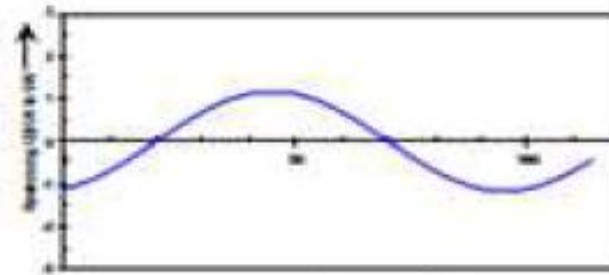
Transformer



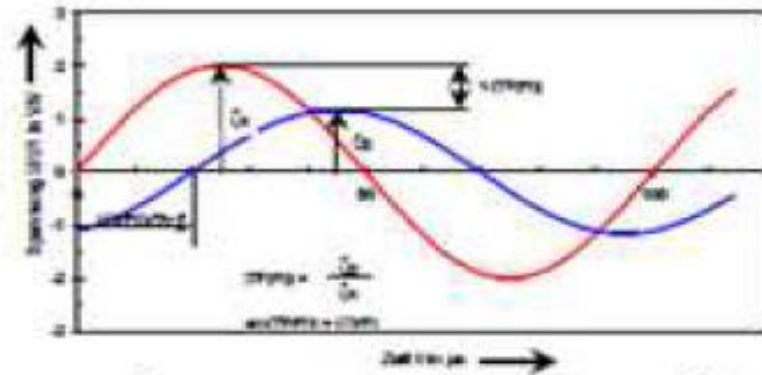
Input signal
(sine wave of
variable frequency)



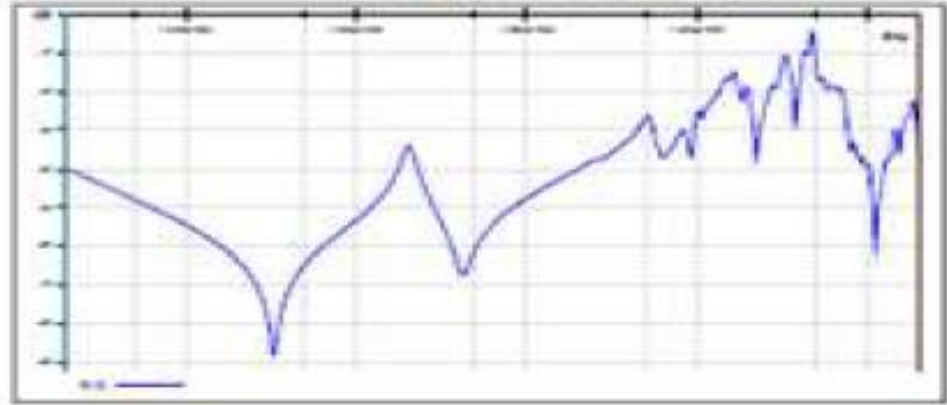
Complex RLCM network



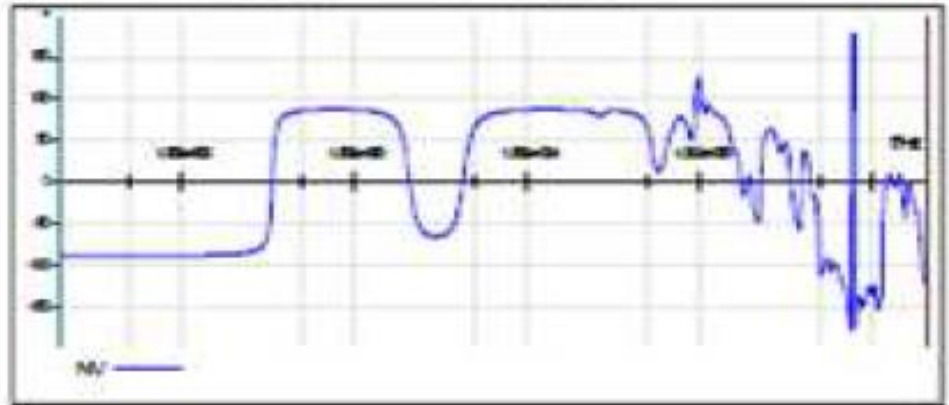
Output signal



Magnitude



Phase



FRA mérés általános
elvé

A TF (Transfer Function), ill. FRA görbék felvétele

Az FRA mérés lényege, hogy egy változó frekvenciájú szinuszos hullámot kapcsolunk az egyik oldalra, miközben a bemenő és választ jelet egyidejűleg rögzítjük. A mért frekvencia, amplitúdó (A) és fázisszög φ értékek lineáris – logaritmikus koordináta rendszerben kerülnek rögzítésre, az alábbi definíció szerint:

$$A = 20 \lg_{10} \left| \frac{U_1(j\omega)}{U_2(j\omega)} \right| \quad \phi = \tan^{-1} \left[\frac{U_1(j\omega)}{U_2(j\omega)} \right]$$

A tapasztalat szerint az így definiált FRA függvénygörbe pontos információt ad a tekercs deformációról, de a szubjektív kiértékelés mellett jó lenne **„számszerű” eredmény is.**

Tehát a tekercs deformációjának **korrekt becslése még problémás az FRA technikában.** Jó lenne tudni számszerűen, hogy milyen nagyságú FRA változás engedhető még meg, amely még elfogadható a trafó tekercs elmozdulásból származik, amely még nem okoz meghibásodást, amely még az üzemben megengedhető.

FRA jelek „kezelése”

Ezért szükséges egy olyan matematikai módszer, amely lehetővé teszi két FRA görbe megegyezőségének meghatározását.

Két változó mennyiség közötti kapcsolat vizsgálatára legelterjedtebb a korrelációs együttható, ill. a négyzetes szórás.

A korrelációs együttható lényegében két mérőszám görbe hasonlóságának matematikai mennyiségekkel történő jellemzése, a négyzetes szórás pedig a két görbe közötti abszolút különbséget írja le.

Esetünkben két különböző időpontban felvett FRA A kapcsolat szorosságát, a függőség fokát kell mérnünk.

Matematika segítsége az FRA kiértékelésekben

- Az állapot a deformáció **előtti és utáni** görbék változásából becsülhető.
- Matematika nyelvén a két FRA görbe **korrelációs együtthatóját, ill. négyzetes szórását kell számolnunk. A korrelációs együttható a két görbe hasonlóságát, a négyzetes szórás pedig a két görbe közötti abszolút különbséget írja le.**
- A korrelációs tényező **+1(-1)** között változik. Ez a faktor két véletlen változó közötti lineáris korrelációt adja meg.

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N x(i)y(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N x(i)^2 \sum_{i=1}^N y(i)^2}}$$

Korrelációs együttható

$$E_{xy} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [x(i) - y(i)]^2}{N}}$$

Négyzetes szórás

Algoritmussok, Kínai FRA szabvány alkalmazása

Az **FRA** technika viszonylag széles frekvenciatartományban (**pl. 1Hz-1Mhz**) **veszi fel az átviteli függvényeket (ismert még TF=Transfer Function, vagy frekvencia válasz).**

A kínai FRA szabvány három frekvencia tartományban definiált korrelációs tényezőt alapszik, amely bevezeti a „ ρ_{xy} ” korrelációs faktorból levezetett „relatív” R_{xy} tényezőt.

A diagnosztika lényege, hogy **összehasonlítjuk** a különböző időpontokban felvett FRA görbéket és nézzük a **referenciának tekintett állapothoz képesti változást.**

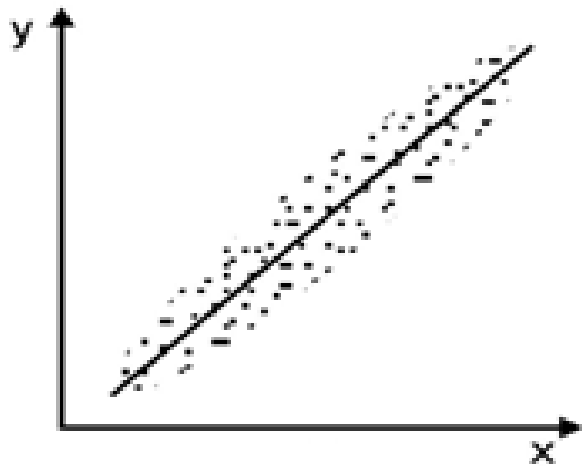
Ismert, hogy a kínai szabvány a vizuális összehasonlításon kívül már számszerű összehasonlítást használ. is szerepel.

Komoly **erőfeszítések történnek olyan algoritmusok** kifejlesztésére, amelyek képesek a két görbe azonosságának, ill. különbözőségének mennyiségi meghatározására.

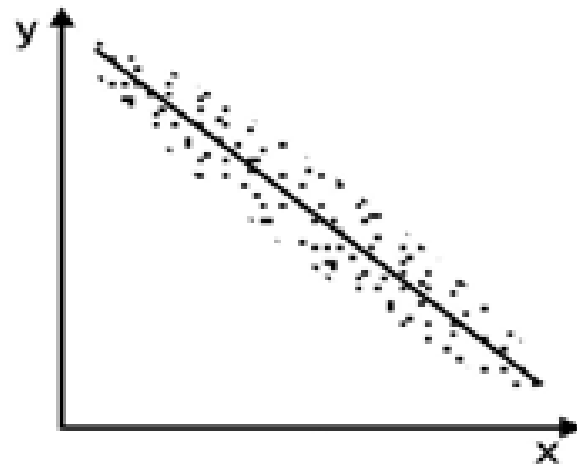
Az új CIGRE TB 812 kiadvány **számos FRA kiértékelő algoritmust mutat be és vezet be különböző indexeket**, hogy az **FRA kiértékelés ne csak szubjektív, hanem inkább mennyiségi jellegű legyen.**

FRA jelek „kezelése”

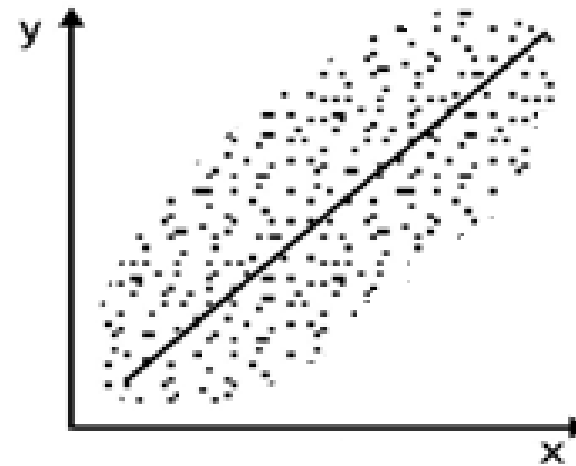
A korrelációs együttható előjele megmutatja, hogy az összefüggést jellemző egyenes emelkedő, vagy süllyedő:



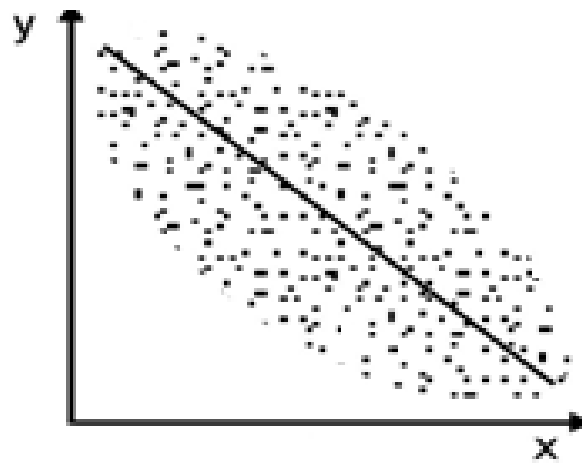
lineáris pozitív korreláció



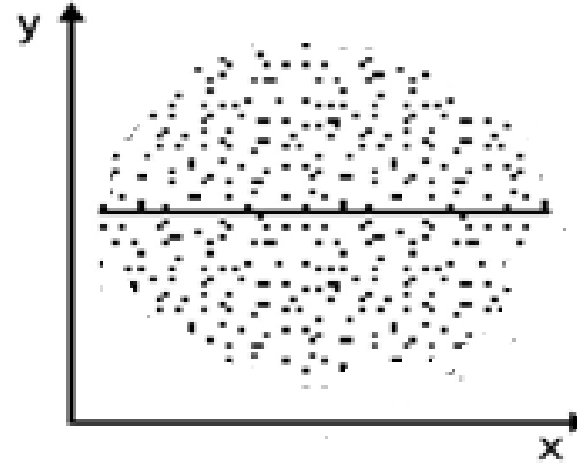
lineáris negatív korreláció



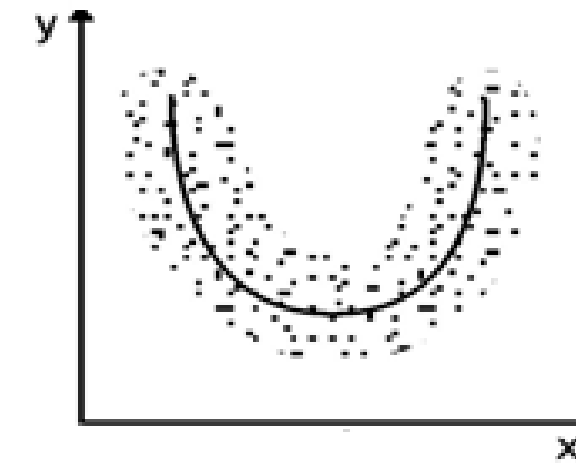
lazább pozitív korreláció



lazább negatív korreláció



korrelálatlanság



nemlineáris korreláció

**Lineáris pozitív
vagy negatív
korreláció,
lazább pozitív
vagy negatív
korreláció,
korrelálatlanság,
nem lineáris
korreláció.**

Algoritmusok hasznossága, érzékenysége-Esettanulmány

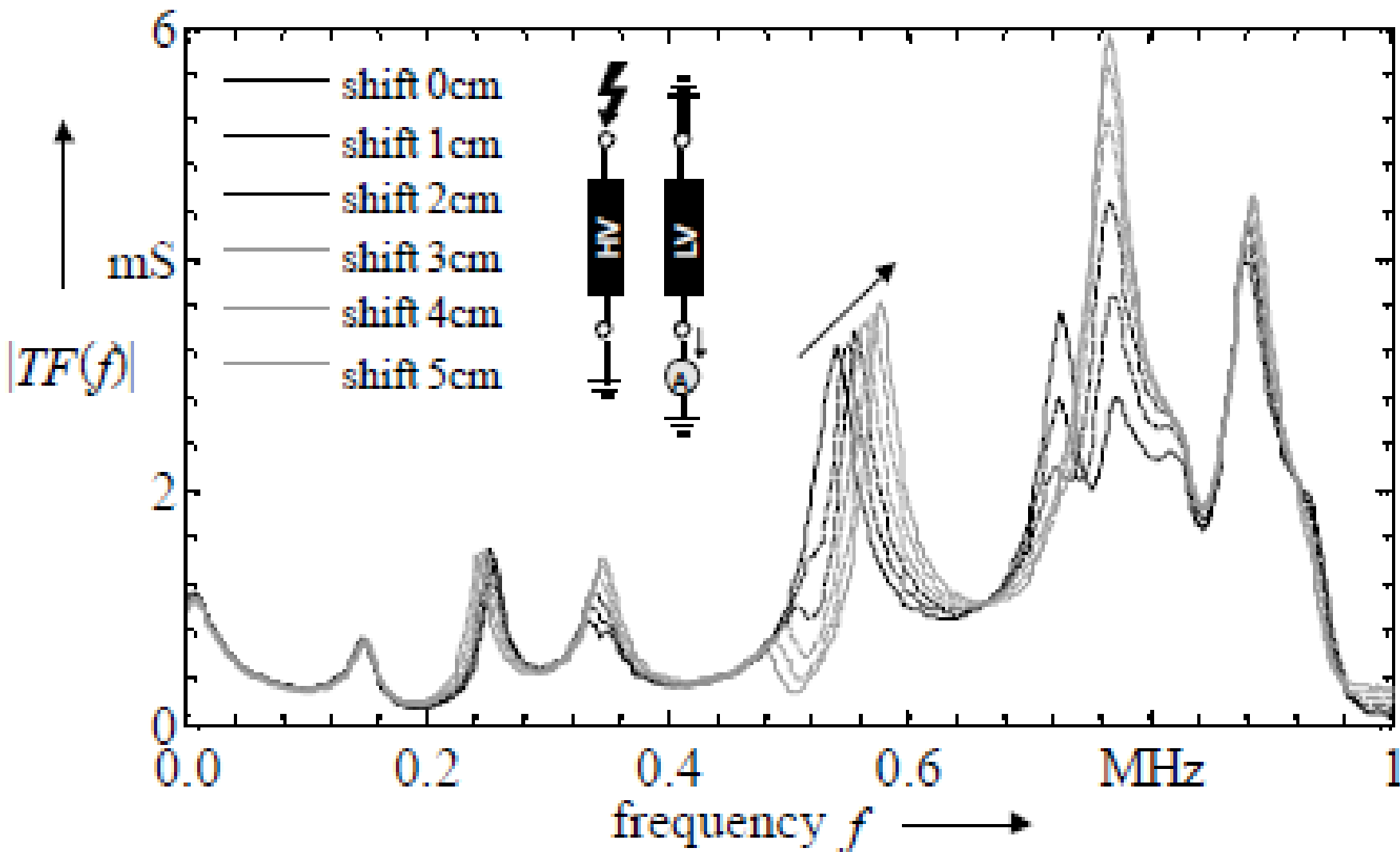
Az algoritmusok érzékenysége (hasznossága, alkalmassága)-Esettanulmány

Az algoritmusok érzékenységének vizsgálatára speciális tekercseket gyártottak le. **Az axiális tekercselmozdulás szimulálására egy 400kVA-es méretű tekercset készítettek.** A tekercs blokkon az **LV tekercset mozgatták 1cm-ként a HV tekercshez képest az alábbi táblázat szerint.**

level of Shift (los)	Shift of the LV winding in axial way
1	TF with 0 cm shift of LV-winding
2	TF with 1 cm shift of LV-winding
3	TF with 2 cm shift of LV-winding
4	TF with 3 cm shift of LV-winding
5	TF with 4 cm shift of LV-winding
6	TF with 5 cm shift of LV-winding

Algoritmusok hasznossága, érzékenysége-Esettanulmány

A sorozatos axiális tekercseltolás FRA eredményei (lásd ábrát). A gerjesztés a HV tekercsen, a válaszjel (földelés oldali áram) mérése az LV tekercsen (nem mért kapcsok földelve).



Nem tipikus FRA mérés, de jó eset tanulmányozásra:

LV tekercs fokozatos mozgására új rezonancia frekvencia jelent meg kb. **480kHz** környékén, és anti-rezonancia tűnt el kb. **340kHz-nél**

Algoritmusok hasznossága, érzékenysége-Esettanulmány

Az algoritmusok érzékenységének vizsgálata

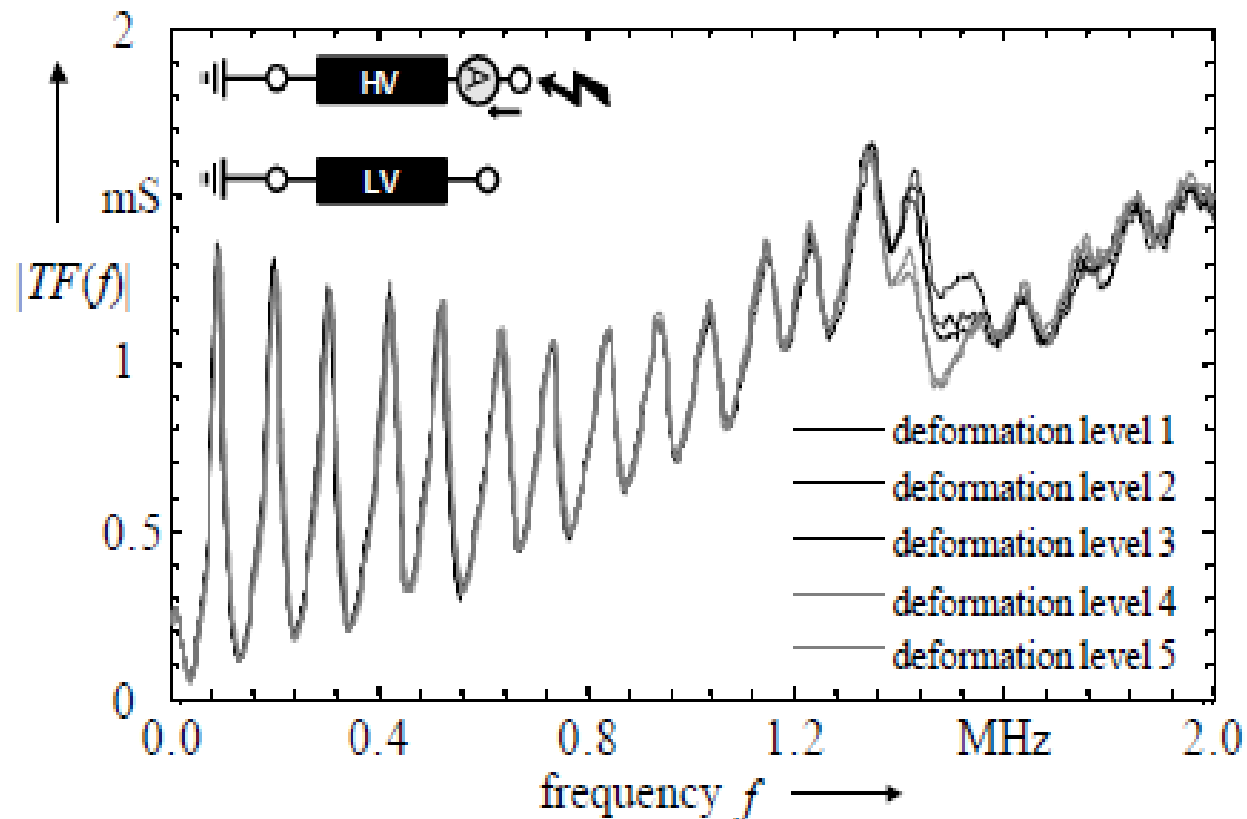
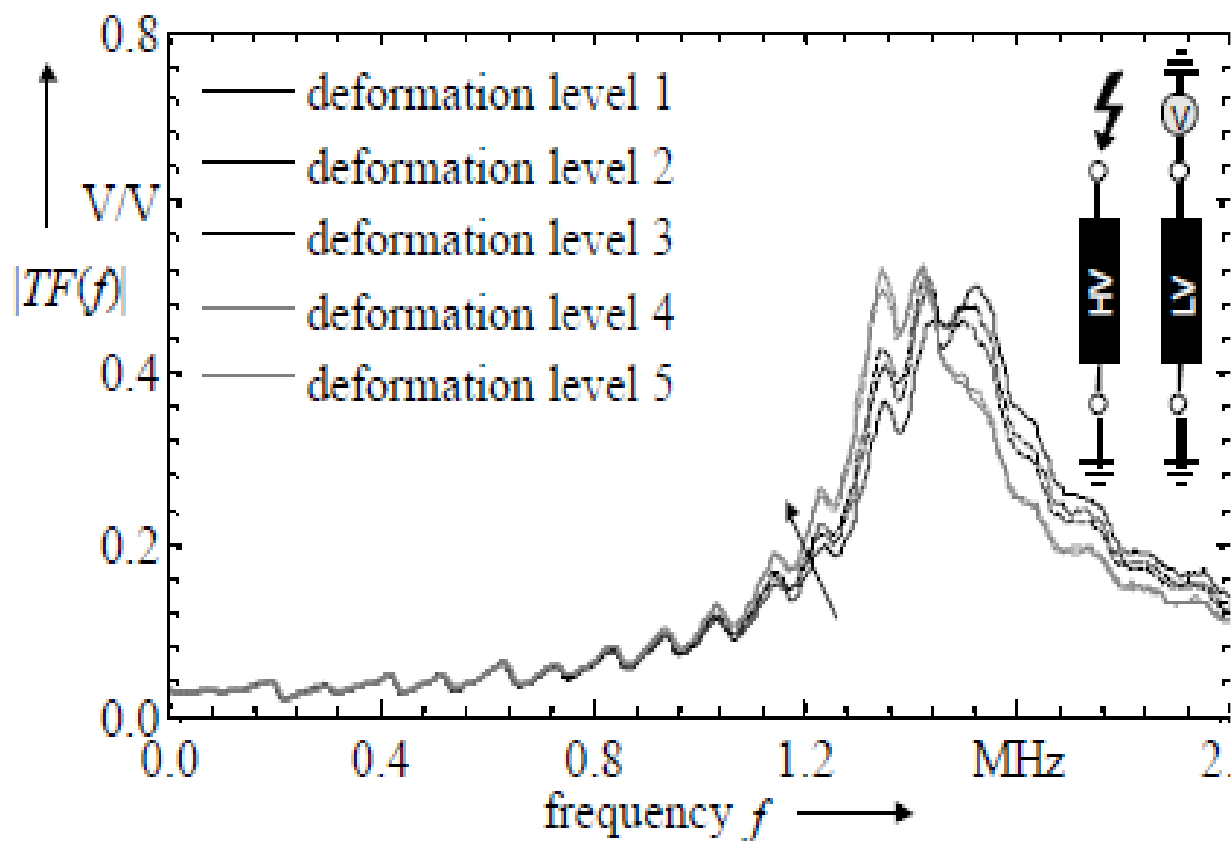
A radiális tekercselmozdulás szimulálására egy 10/0,4kV, 1,2MVA trafó került felhasználásra.

A tekercs blokkon jól definiált deformációkat hoztak létre egy speciális „nyomó, préselő” géppel 1cm-es lépésekben. Ez az LV tekercs átmérőjéhez viszonyítva 3,5%-nak felelt meg. Az axiális kiterjedtség is változott, lépésről lépésre (lásd az alábbi két ábrát is).

level of deformation (lod)	radial deepness of the deformation	relative, axial extent of the deformation
1	1 cm	0 % of the coil length
2	1 cm	10 % of the coil length
3	1 cm	30 % of the coil length
4	1 cm	60 % of the coil length
5	1 cm	100 % of the coil length

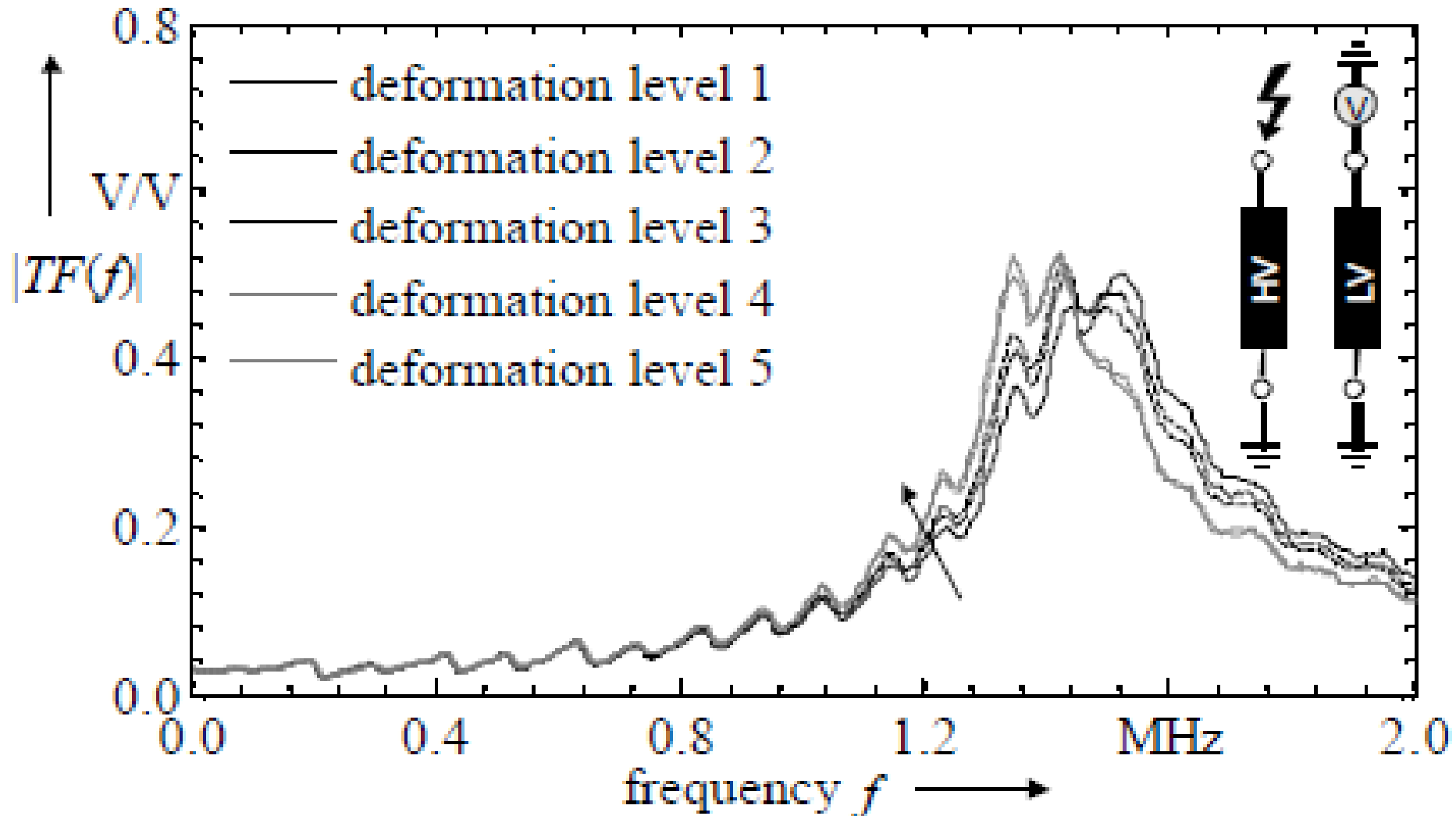
Algoritmusok hasznossága, érzékenysége-Esettanulmány

A **sorozatos radiális deformáció FRA** mérési eredményei (lásd az alábbi két ábrát). A gerjesztés **mindkét esetben a HV tekercsen**, de a válaszjel első esetben az **LV tekercsen mért átvitt feszültség**, a másik esetben a HV tekercsen mért input áram.



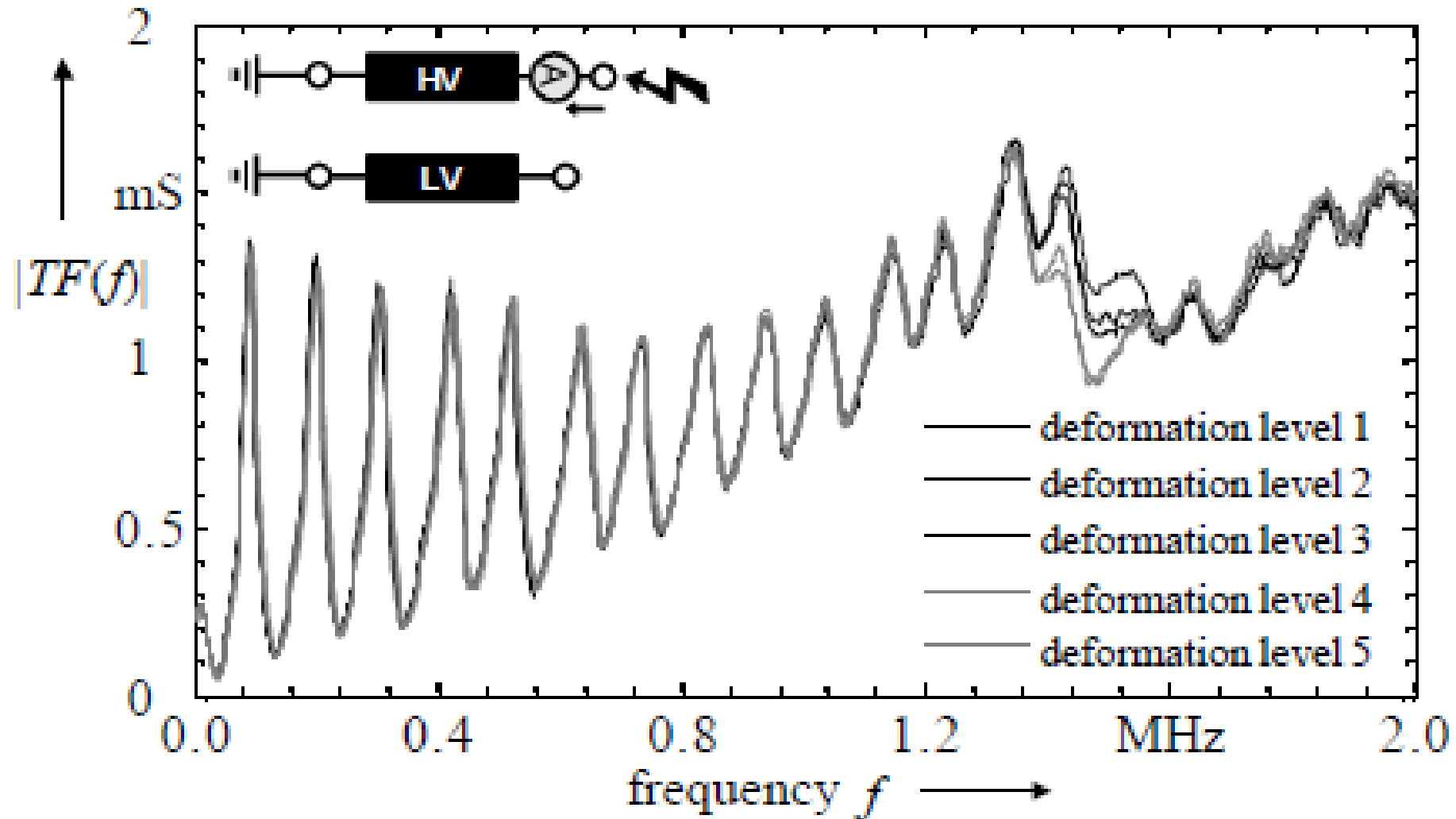
Algoritmusok hasznossága, érzékenysége-Esettanulmány

A gerjesztés mindkét esetben a HV tekercsen, de a válaszjel első esetben az **LV** tekercsen mért átvitt feszültség.



Algoritmusok hasznossága, érzékenysége-Esettanulmány

A gerjesztés mindkét esetben a HV tekercsen, de a válaszjel a második esetben a **HV tekercsen mért input áram**.



Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

Tehát eseteinkben volt **vizuális FRA kiértékelés (lásd előző ábrákat): A vizuális kiértékeléshez** az FRA görbék két elrendezés mérésén kerültek rögzítésre, láthatóak, hogy hol a legerősebb a változás különböző mértékű eltolódási folyamatok során.

Az alábbiakban az algoritmusok vizsgálata történik, azaz a mennyiségi kiértékelés.

A mennyiségi kiértékelés, azaz az algoritmusok viselkedése **korrelációs tényezővel és normál szórással történt.**

A három FRA (TF) görbének megfelelően három számítás lett elvégezve, **indexekkel lett jelölve mérési adatok megkülönböztetése céljából:**

Index 1: az axiális elmozdulás adathalmaza,

Index 2: radiális deformáció, átviteli feszültséggel, mint válaszfüggvénnyel,

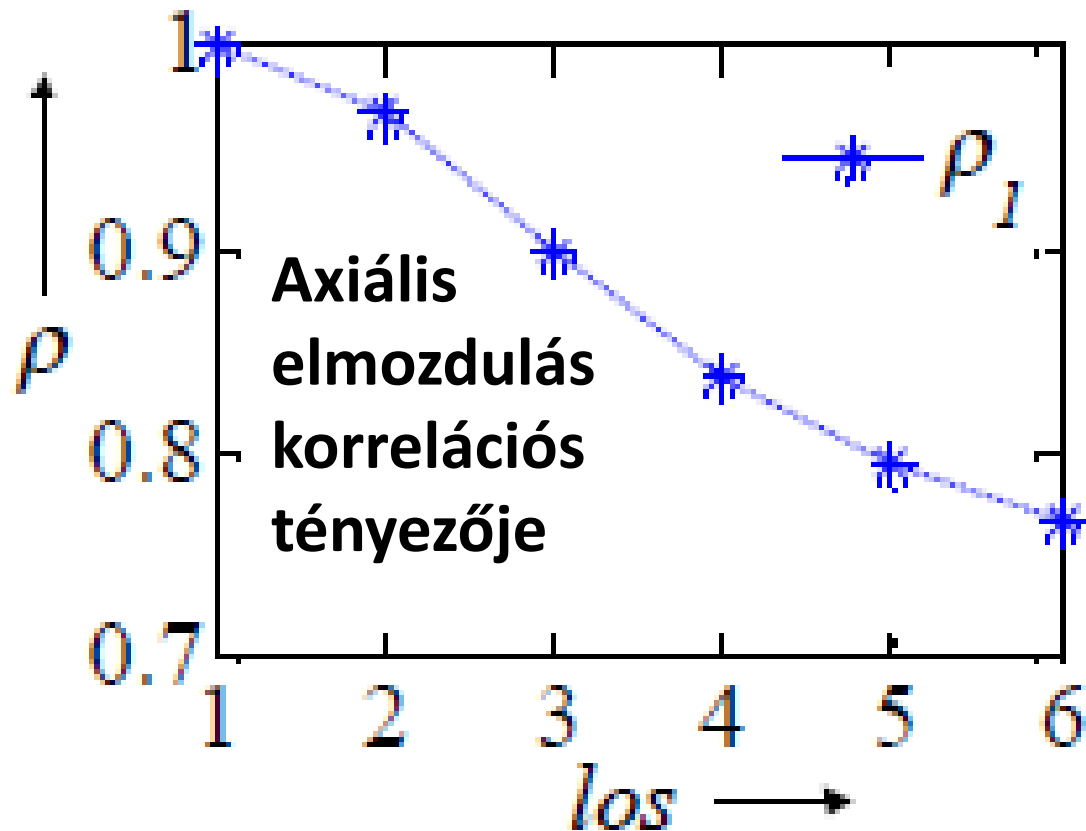
Index 3: radiális deformáció elmozdulás, válasz függvény az input áram.

Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

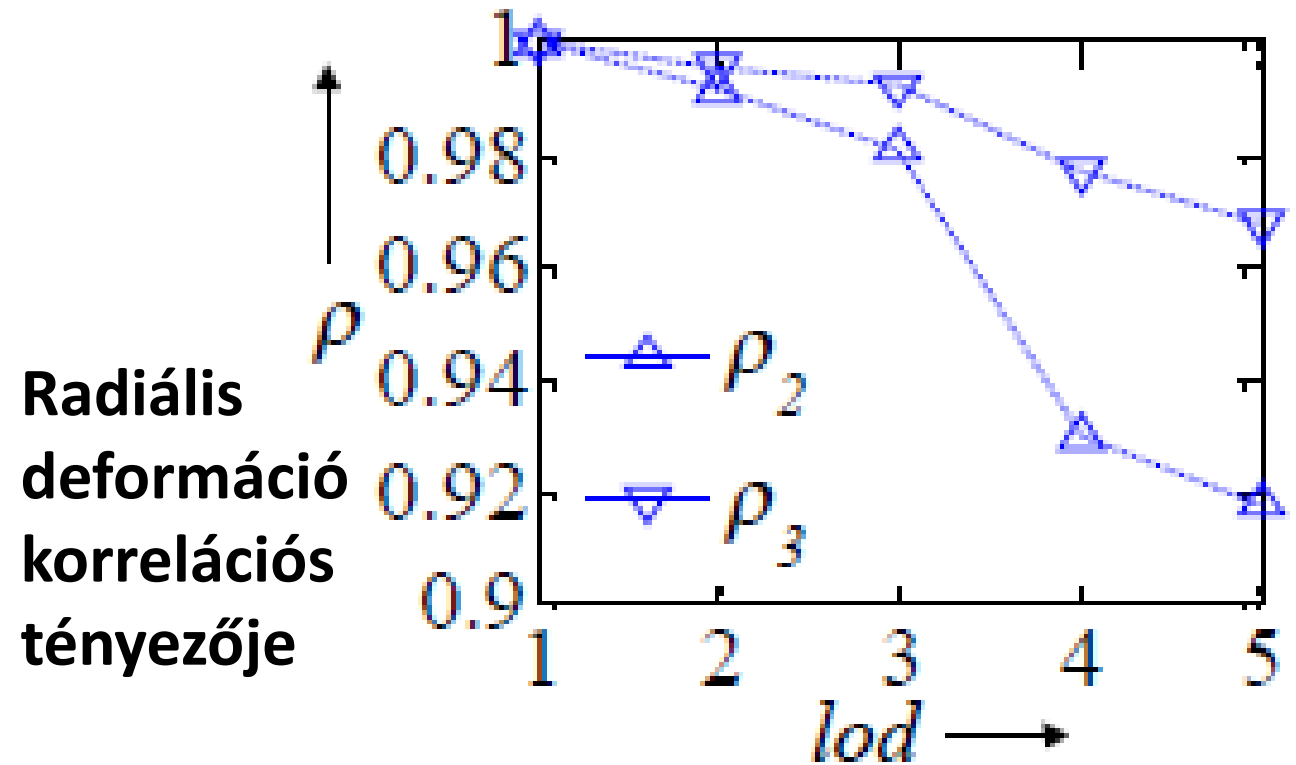
Az algoritmusok vizsgálata

Először a teljes frekvenciatartományban végezték az algoritmus vizsgálatát, majd különböző rész-frekvencia tartományokban. Számos matematikai függvény felrajzolásra került, mint pl. az alábbiak:

los: level of shift

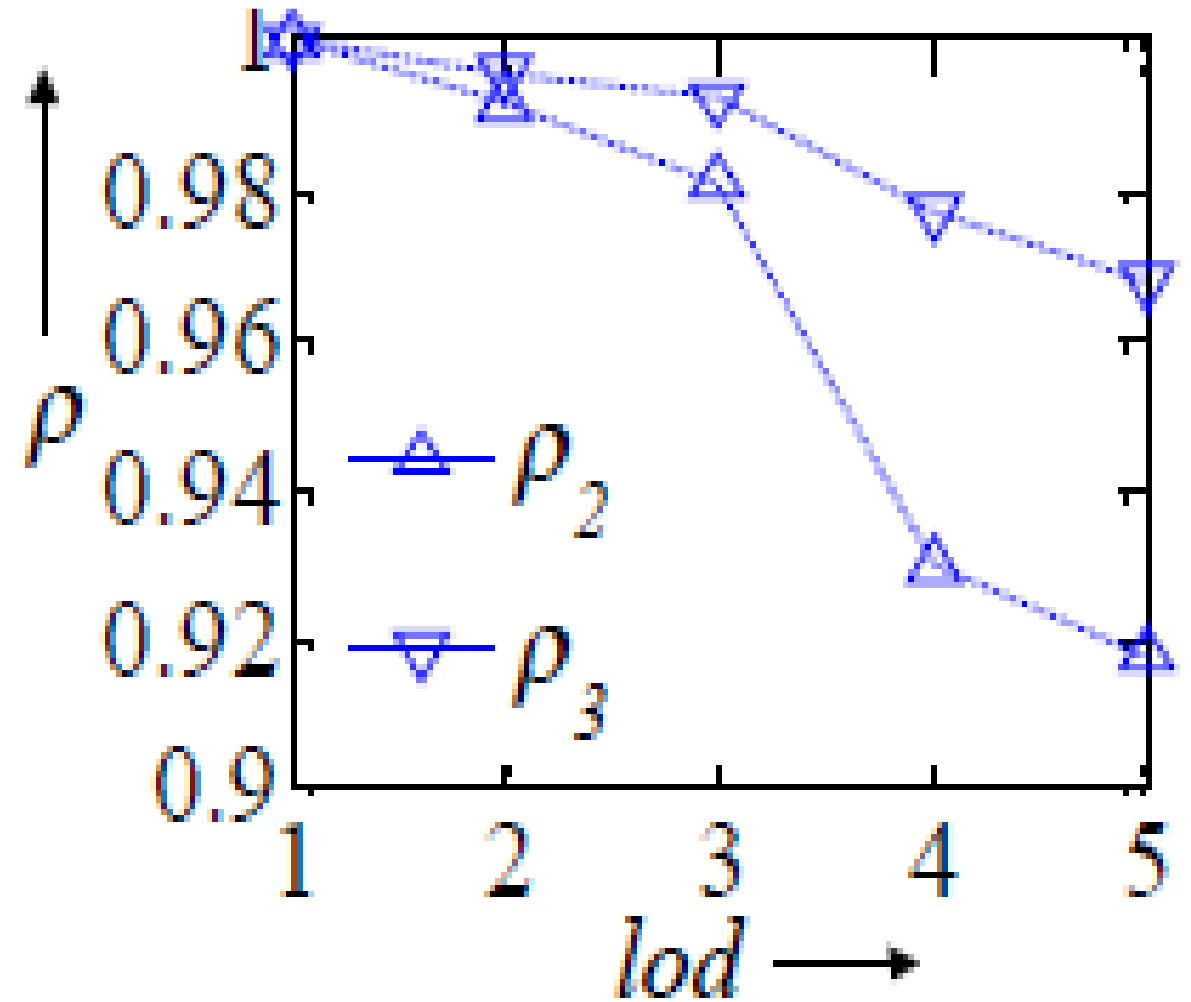
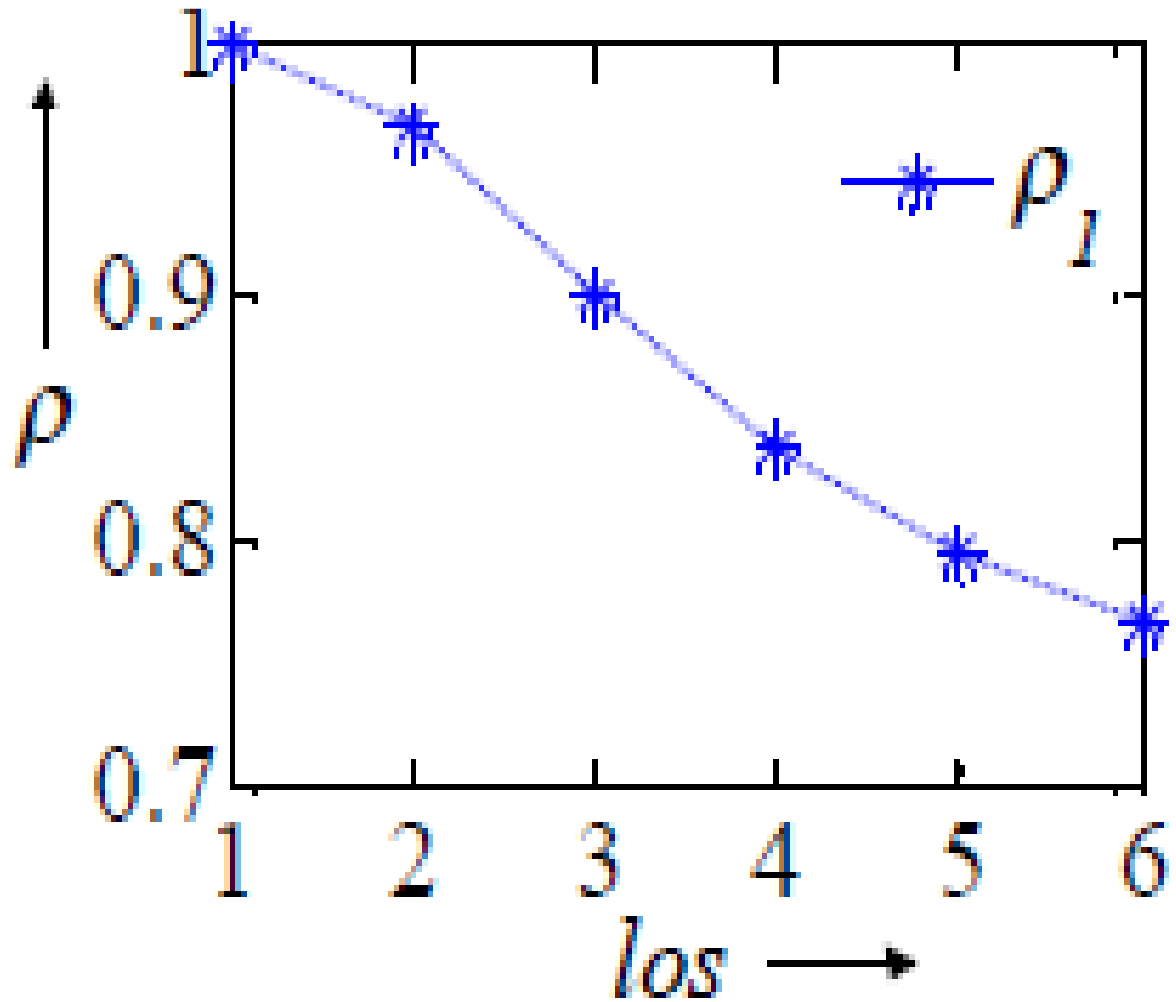


lod: level of deformation.



Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

Axiális elmozdulás korrelációs tényezője, és radiális deformáció korrelációs tényezője
los: level of shift
lod: level of deformation.



Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

Számos algoritmus kipróbálásra került az FRA görbék hasonlóságának, ill. eltérésének vizsgálatára, és mindegyik algoritmus többé-kevésbé jelezte az FRA görbék változásait.

Tehát a vizuális kiértékelés mellett lehetőség van a mennyiségi kiértékelésre is.

Az a tapasztalat, hogy a teljes mérési spektrum frekvencia tartományokra osztása és azon belüli kiértékelés növeli az FRA diagnosztika érzékenységét.

Az **FRA görbékől vizuálisan látható**, hogy különböző frekvencia tartományokban más és más a görbék változása. Ott, ahol nagyobb a görbe változása, várhatóan nagyobb érzékenységgel rendelkezik az alkalmazott algoritmus.

Tehát az egyes algoritmusok is **más-más érzékenységgel rendelkeznek**, az egyes frekvencia **tartományban is más-más a változás**, ezért érdemes felosztani a frekvencia tartományt.

Itt említhető meg, hogy a kínai FRA szabvány már ilyen jellegű mennyiségi FRA kiértékelést tartalmaz, és definiál al-frekvencia tartományokat is.

Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

Tehát az FRA görbék vizuális megtekintése során láthatjuk, hogy a TF (Transfer Function) görbék nem egyenletesen osztódnak el a teljes frekvencia tartományban, **jobban kötődnek egyes (nem teljes) tartományokhoz.**

Ezért nyilvánvaló volt, hogy a teljes frekvencia tartományt **kisebb szekciókra kell osztani**, amellyel **növelhetjük az FRA algoritmusok érzékenységét.**

Tehát kisebb tartományok kiértékelésével, ahol erősebb a változás a mérési adatokban, növekszik érzékenység és a biztonság is.

A fenti megfontolások figyelembevételével a **kínai szabvány három al-frekvencia tartományt jelölt ki:**

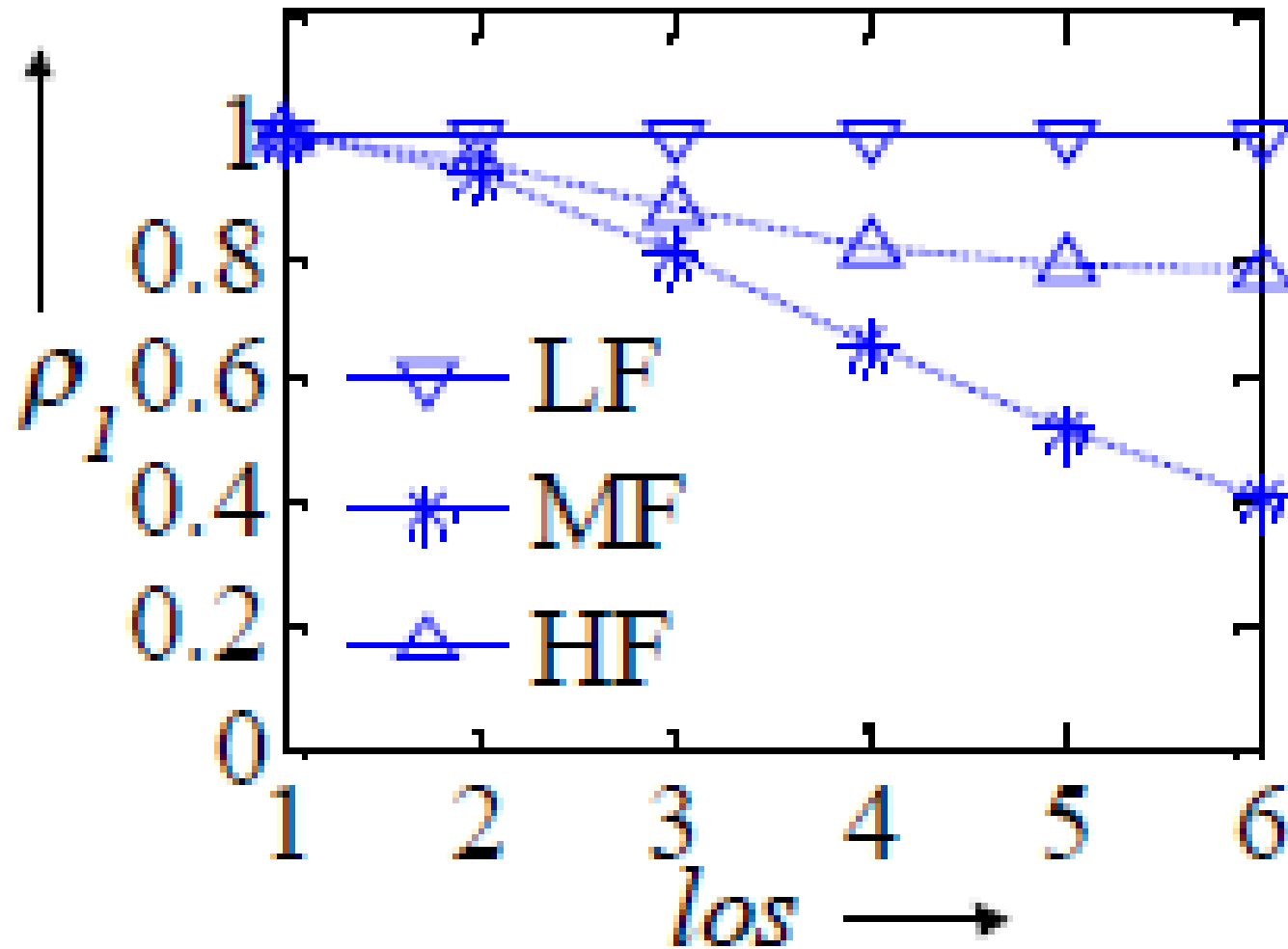
LF: 0-100kHz

MF: 100-600kHz

HF: 600kHz-1MHz

Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

Az alábbi ábrán látható, hogy az **MF tartományban** erősebb az eltolás a korrelációs faktor szerint, és ez igaz FRA görbét szemlélve is.



LF: 0-100kHz

MF: 100-600kHz

HF: 600kHz-1MHz

Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

Az R_{LF} faktor jelenti a relatív R_{xy} faktort az **LF tartományban**:

Az R_{MF} faktor jelenti a relatív R_{xy} faktort az **MF tartományban, stb.**

Degree of deformation of the winding	Limits for the relative factor R_{xy}
severe deformation	$R_{LF} < 0.6$
obvious deformation	$1.0 > R_{LF} \geq 0.6$ or $R_{MF} < 0.6$
slight deformation	$2.0 > R_{LF} \geq 1.0$ or $0.6 \leq R_{MF} < 1.0$
normal winding	$R_{LF} \geq 2.0, R_{MF} \geq 1.0$ and $R_{HF} \geq 0.6$

A **relatív faktorok kombinációban** a **definiált küszöbértékekkel**, kipróbálásra kerültek az axiális elmozdulásos TF-el, ill. a radiális deformációs TF-el (átvitt feszültség) esetek.

Három deformációs fok: súlyos, szembetűnő, csekély.

Kínai FRA szabvány alkalmazása CIGRE TB 812-ben

Kínai szabvány alapján számolt deformáció

Degree of deformation of the winding	Limits for the relative factor, R_{xy}
Severe deformation	$R_{LF} < 0.6$
Obvious deformation	$0.6 \leq R_{LF} < 1$ or $R_{MF} < 0.6$
Slight deformation	$1.0 \leq R_{LF} < 2.0$ or $0.6 \leq R_{MF} < 1.0$
Normal winding	$2.0 \leq R_{LF}$, $1.0 \leq R_{MF}$ and $0.6 \leq R_{HF}$

Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

Algoritmusokról röviden:

Ezek az algoritmusok **képesek megbecsülni** az FRA görbék változásait, **de különböző érzékenységgel rendelkeznek a tekercshibák, ill. az FRA változásaitól függően.**

A bemutatott FRA görbénél a **korrelációs faktor a legnagyobb érzékenységgű.**

A frekvencia tartomány felosztása **több altartományokra növelheti az ilyen algoritmusok érzékenységét.**

Az algoritmusok ellenőrizték a maximum, minimum értékek azonosítását, a rezonancia emelkedési területek számolását. **Az összes lényeges rezonancia és anti-rezonancia frekvencia azonosításra került. Azonban a vizsgálandó és a referencia FRA görbék megfelelő minimumok és maximumok kijelölése még problémás.**

Mindenesetre a számítási szabályok **nagy lehetőséggel bírnak az FRA görbék változásainak a detektálásában, mert a becslési eljárás az FRA görbék sajátosságaira alapul.**

Algoritmusok hasznossága, kínai kiértékelés-Esettanulmány

Algoritmusokról röviden:

A küszöb érték pontos leírása nehéz, mert tekercs sérülés esetén néhány trafó esetén az FRA görbék egyértelműen megváltoznak, másoknál azonban nem.

Az FRA görbék viselkedése függ a trafó és a tekercs típusától.

A Kínai FRA szabvány jó kísérlet az FRA kiértékelésre, de **jelenleg nem helyettesítheti az emberi beavatkozást.**

A bemutatott algoritmus megmutatta, hogy **teljes mértékben nem lehet mindegyik FRA görbe változást elemezni.**

Másik lehetőség lenne egy olyan számítási szabályrendszer, **amely számos algoritmust be tudna integrálni.**

Három FRA szabvány kiértékelésének összehasonlítása

- IEC 60076-18: 2012:** Measurement of frequency response
- IEEE PC57.149-2012:** IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers
- Kínai: Std. DL/T911-2004 (2016), ICS 27.100, F24, Document No. 15182-2005, June 1st 2005.** (correlation factors, co-variance of spectra). The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China, "Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers"..

Irányelvek, szabványok, stb. az SFRA mérések végrehajtására

-IEC, IEEE szabványok lényegében „vizuális” FRA kiértékelést ajánlanak.

Lehetséges a vizuális és a mennyiségi FRA kiértékelést együttes használata?

-Eddig az alábbi helyekről merítettük a diagnosztikai lehetőségeket:

-CIGRE TB 342 (2008),TB 812 (2020): Mechanical-condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA),

-IEC 60076-18: 2012: Measurement of frequency response

-IEEE PC57.149-2012: IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers.

Kínai FRA szabványban a vizuális kiértékelés mellett van ”mennyiségi” is.

- Kínai: Std. DL/T911-2004 (2016), ICS 27.100, F24, Document No. 15182-2005, June 2005.
(correlation factors, co-variance of spectra). The Electric Power Industry Standard of People’s Republic of China, “Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers”.

Kínai szabvány szerinti FRA kiértékelés

A görbéket a teljes frekvencia tartomány mellett a kínai szabvány 3 „al-frekvencia tartományban” vizsgálják: kis, közepes, nagyfrekvenciás tartomány. Számolják az egyes tartományokra vonatkozó **korrelációs együttható és szórás értékeket**, valamint az „R” és „E” különböző frekvencia tartományi értékeit: azaz, az **MF/LF, HF/LF** arányokat is.

A teljes FRA kiértékelés a teljes FRA spektrum összehasonlításán, valamint az egyes frekvencia tartományokra felvett a korrelációs együttható és szórás alapján történik.

A kínai szabvány **3 fő frekvencia tartományt definiál**: Region 1, 2 és 3. (IEEE 1MHz felett is).

Region 1: **1kHz–100kHz**: Region 2: **100kHz–600kHz**: Region 3: **600kHz – 1MHz**.

- R_{LF} =korrelációs együttható alacsony frekvencia tartományban
- R_{MF} =korrelációs együttható közepes frekvencia tartományban
- R_{HF} =korrelációs együttható magas frekvencia tartományban
- E_{LF} =négyzetes szórás alacsony frekvencia tartományban
- E_{MF} =négyzetes szórás közepes frekvencia tartományban
- E_{HF} =négyzetes szórás magas frekvencia tartományban

A diagnosztika hatékonyságának bemutatása, ill. javítása céljából 3 FRA szabvány kiértékelésének összehasonlítása (Kínai, CIGRE, IEEE) jó tanulási lehetőség lehet.

Kísérleti munka

-Két 30 MVA-es, 33/11 kV-os elosztó hálózati trafót vizsgáltak.

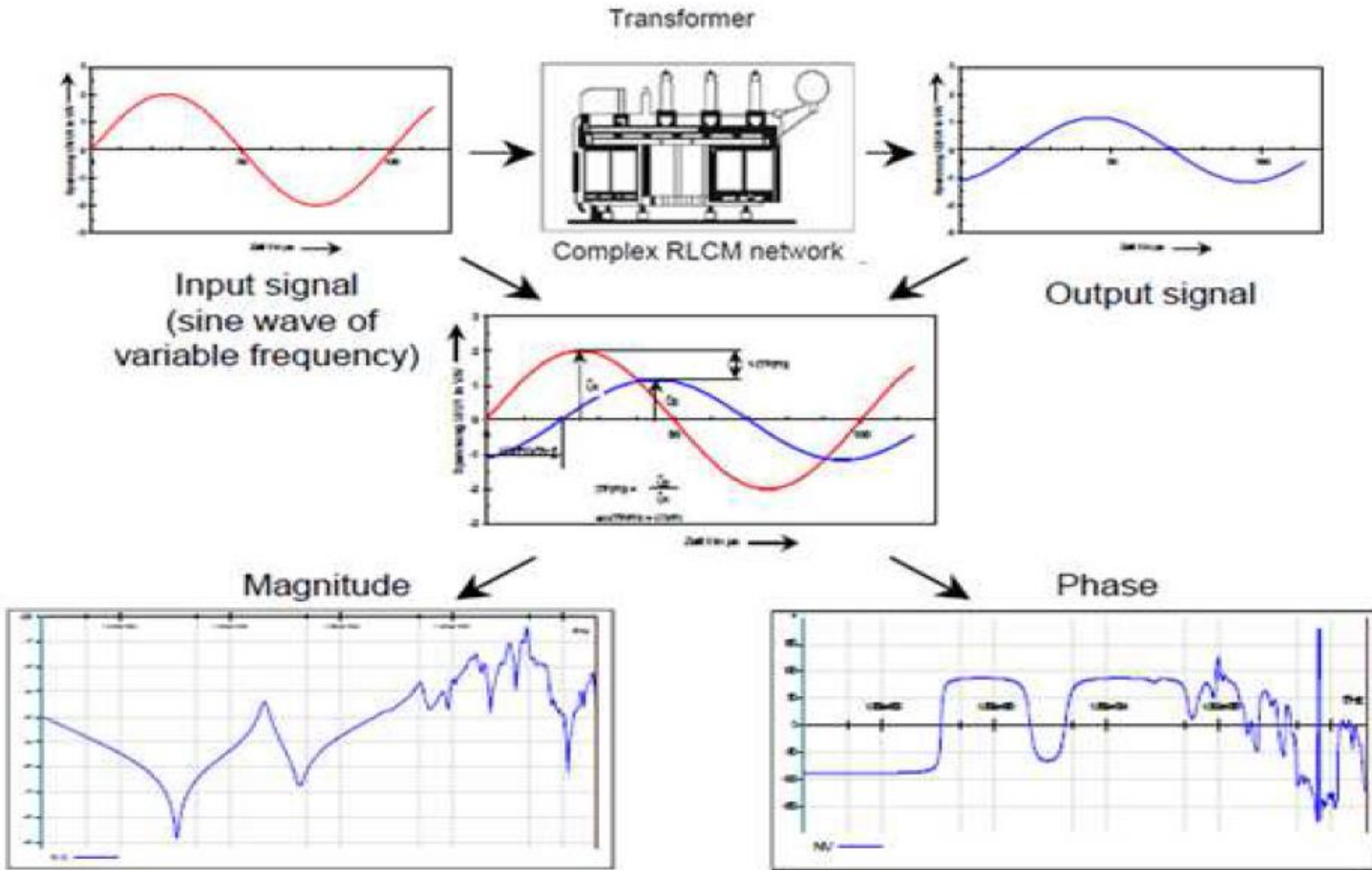
-Mindkét trafó több mint 20 éve üzemelt. FRA mérést az OMIKRON FRAnalyzer műszerrel végezték.

-Ez a készülék rendelkezik a „Chinese Standard DL/T 911-2004 (2016)” FRA kiértékelő rendszerrel. (Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers)

-A méréseket a 20 Hz – 2 MHz-es tartományban végezték el.

-A mérések rendszere az alábbi ábrán látható: elemzésre kerül az input és az output jel amplitúdója és a fázisszöge.

Az elvégzett FRA mérések koncepciója

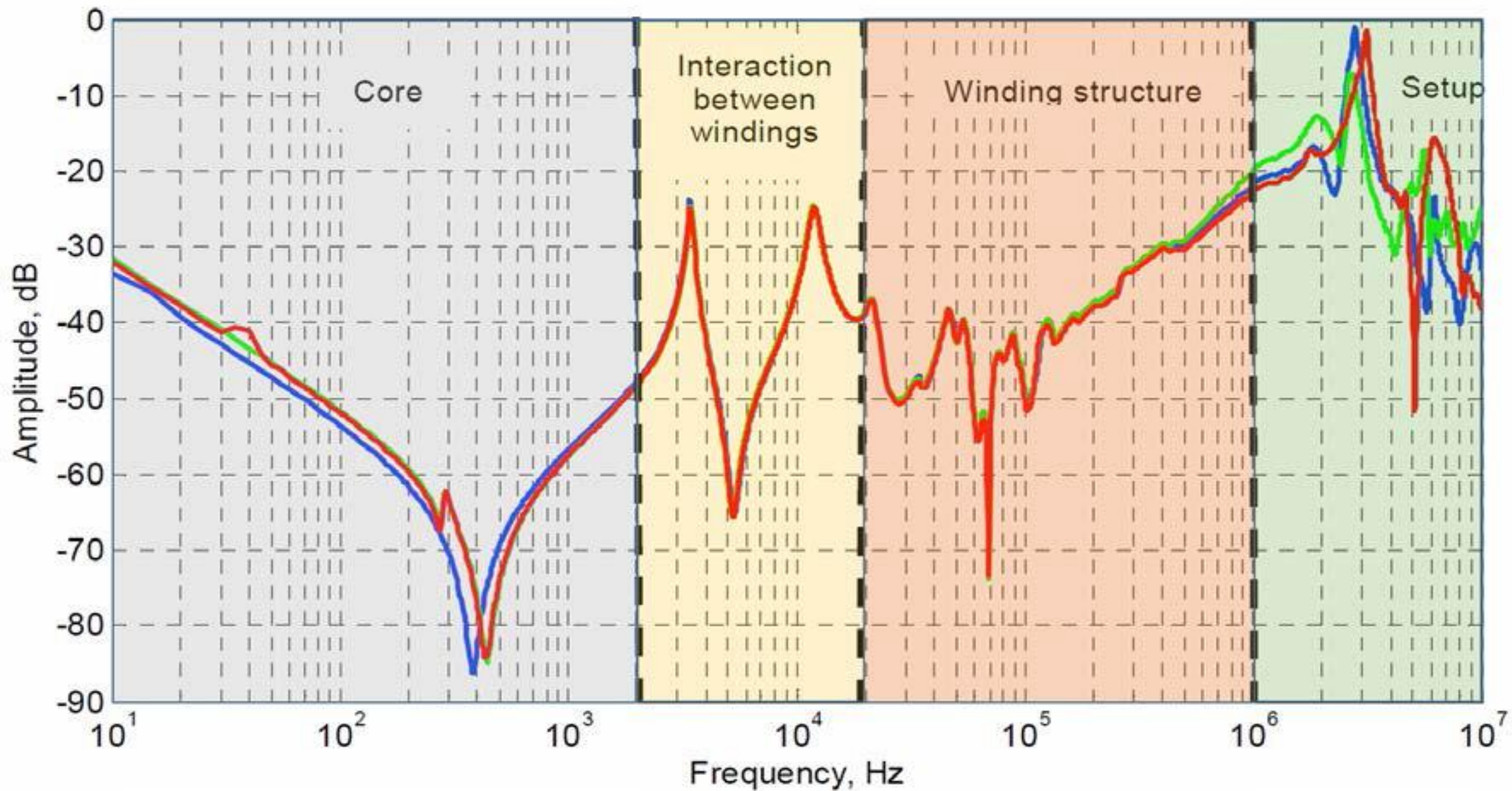


- Az alábbi táblázat** a három **szabvány** által frekvencia sávok szerint meghatározott frekvencia spektrumot tartalmazza.
- Mindegyik tartomány **kapcsolódik** a trafó valamely eleméhez.
- A kínai szabvány három **fő tartományt definiál**: Region 1, 2 és 3.
- A szabványok a **tekercsekre fókuszálnak**.
- A CIGRE WG A2.26 (IEC) „szabvány” a **kínaihoz hasonlóan 3 tartományt definiál**. Az IEC szabványnál, az összes gyűjtött adatba beleértendő az 1 kHz-nél kisebb adatok is.
- Ennek a tartománynak az értékelése lehetővé teszi a **vasmag elemzését is**.
- A **Region 1 érzékenysége** fontos *a vasmag hibánál*.
- A **Region 2** tartományban a *radiális elmozdulást lehet detektálni*.
- Végül a **Region 3** a **tekercs axiális deformációjára jellemző**.

A három szabvány FRA frekvencia tartományai

FRA Standards	Frequency Sub-Bands			
	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4
Chinese Standards DL/T911-2004	1 kHz to 100 kHz	100 kHz to 600 kHz	600 kHz to 1 MHz	-
Cigre Standards WG A2/26	< 10 kHz	10 kHz to 500 kHz	200 kHz to 1 MHz	-
IEEE Std C57.149 2012	20 Hz to 10 kHz	5 kHz to 100 kHz	50 kHz to 1 MHz	> 1 MHz

Az FRA spektrum 4 fő tartományra osztható



Az FRA spektrum 4 fő tartományra osztható:

- „1” alacsonyfrekvenciás tartományban a vasmag hatása dominál: függ a mag mágnesező indukciójától és a trafó kapacitásától (2kHz-ig). Egy háromoszlopos trafónál a középső fázis ebben a tartományban általában **egy rezonancia ponttal** rendelkezik, mert a vasmag szimmetrikusan zárul a másik két fázis felé, **de a szélső két fázisnak általában két rezonancia pontja van**. A vasmag maradék mágnesezése ugyancsak befolyásolja ezt a tartományt.
- „2” középső tartományban a **tekercsek közötti kapcsolat dominál**. Ez a tartomány **2-20kHz közötti**. Ez a rész függ a tekercsek közötti kapcsolattól, (delta, Y), autótrafó, stb., **egyfázisú, vagy 3 fázisú**.
- **Autótrafó** esetén ebben a tartományban általában **két rezonancia**.
- „3” **nagyobb frekvenciás tartomány (20kHz-1MHz)**: a tekercsek **egyedi tulajdonságai**, belső kötések dominálnak: meghatározók a szórási induktivitások, a **tekercsek soros és föld kapacitásai**. Ebben a tartományban a **soros kapacitás a legdominánsabb** tényező, ez határozza meg a **burkoló görbét**. A **nagykapacitással** (átlapolás) készülő trafóknál **több rezonanciás pont van emelkedő** amplitúdóval. A **KF tekercsnél, ahol kicsi a soros kapacitás** általában **lapos görbével rendelkezik** ebben a tartományban.
- „4” **nagyfrekvenciás tartomány (1MHz felett)**, ahol a **mérési elrendezés**, bekötővezetékek, stb. nagyfrekvenciás tulajdonságai dominálnak, **nehezen ismételhető mérések**.
- A kritikus frekvenciák főleg a trafó méretétől függenek

- Az **IEEE Std C57.149 2012** szabvány **4 fő frekvencia tartományt** használ.
- Különbség** van a kínai és a CIGRE, ill. az IEC szabvány között.
- Az **IEEE szabvány** a vasmagra, tekercsre és az érintkezési hibákra koncentrálnak.
- Az **IEEE-nél a Region 1 lefedi a vasmag és a tekercs menet hibát.**
- A **Region 2** érzékeny a tekercs axiális és az általános tekercs hibákra.
- Az **IEEE szabvány szerint**, a **Region 3** és **Region 4** tartományokban detektált radiális deformáció az érintkezési ellenállás, a tekercs menet vagy szakadás miatt jelenhet meg.

Eredmények és kiértékelés

A két trafó mérési adatai külön lettek kiértékelve: jó trafó, rossz trafó.

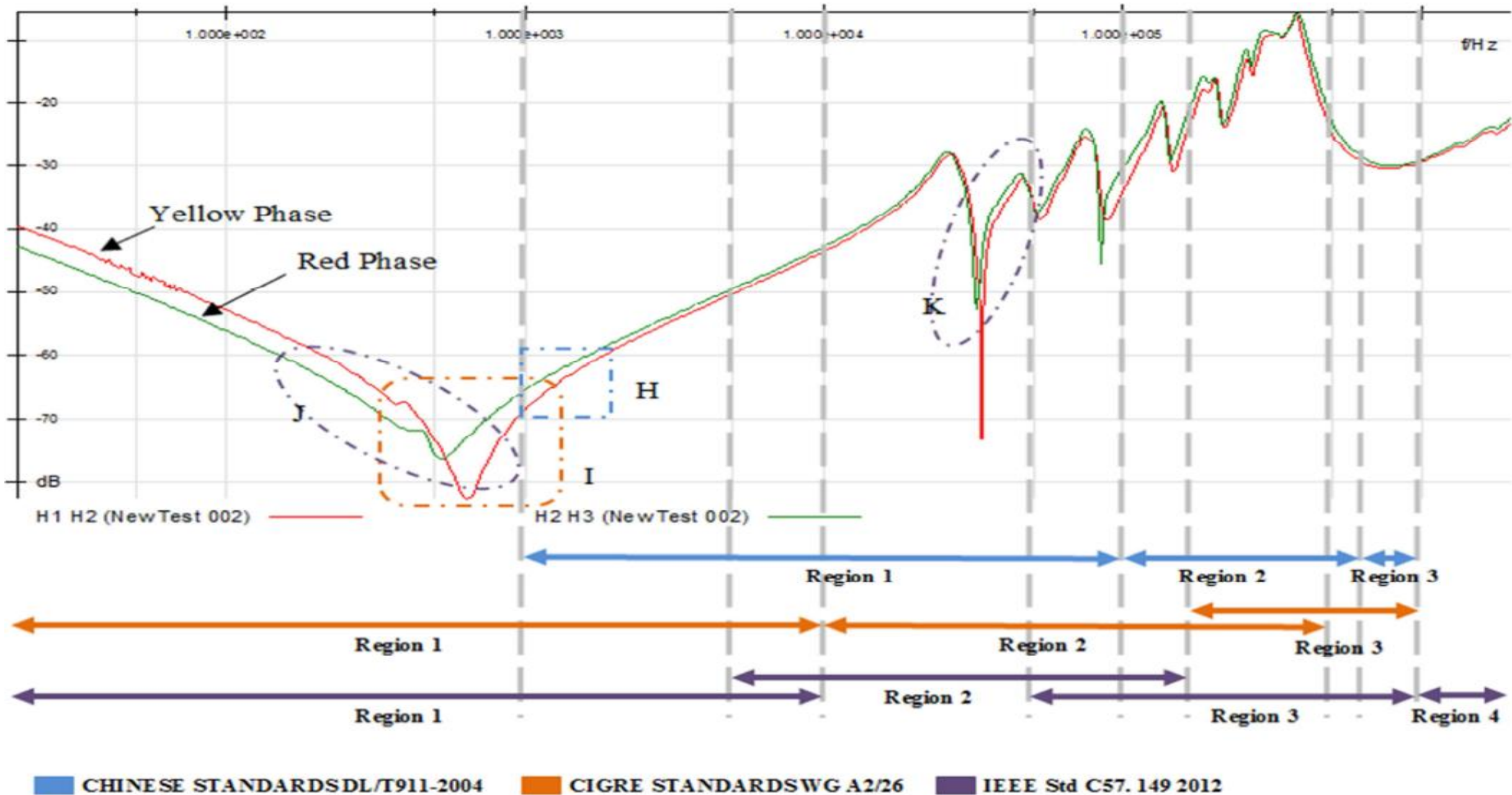
1. Eset tanulmány: jó trafó.

Eben az esetben **jó állapotú trafó** fázis-fázis FRA adatai kerültek összehasonlításra három különböző szabvány szerint.

Region 1 nagyon kis eltérést mutat a két helyen a „H” jelű téglalap kezdeténél. Azt jelenti, hogy a **Piros és Sárga fázis görbéi között jelentős eltérés van.**

A **Region 2 és Region 3** tartományban a görbék azonos nyomvonalon haladnak, ez azt jelenti, hogy **mindkét tekercs jó állapotban van a kínai szabvány szerint.**

FRA eredmények: fázis-fázis összehasonlítás JÓ ÁLLAPOTÚ TRAFÓNÁL



JÓ TRAFÓ

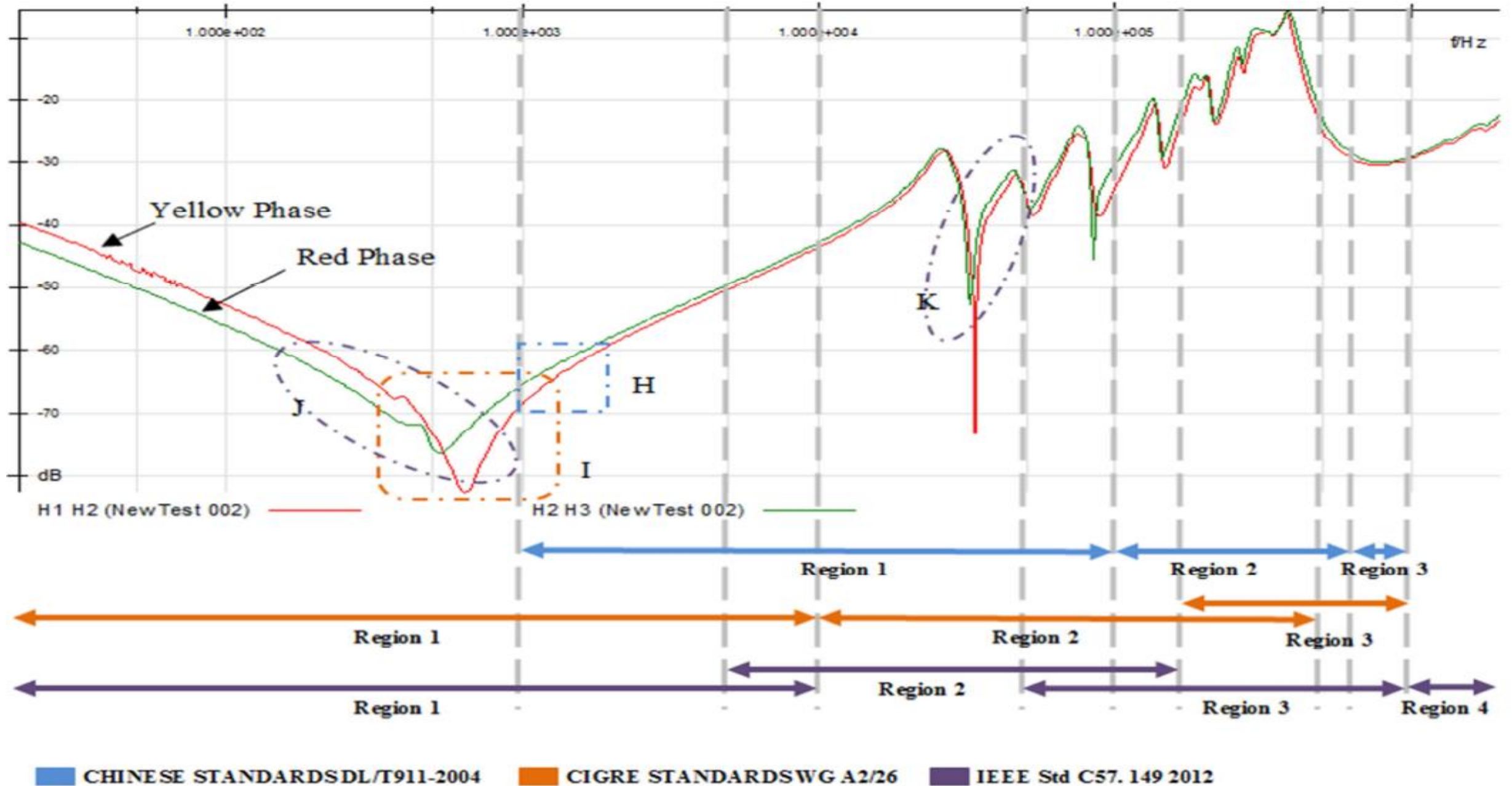
A görbék a **CIGRE szerint** analizálva, **kis eltérés van az Region 1 tartományban az „I” jelű négyszögben**. Ez egy kis vasmag hibát jelez a Sárga fázisban. A kis eltérés még elfogadható egy 20 éve üzemelő trafónál.

Az **IEEE szabvány véleménye szerint**, **kis eltérés van a Region 1 tartomány „J” jelű ellipszis területénél**, ami kis hibát jelent a vasagnál és tekercs menetzárlatot.

Másik kis változás ugyancsak látható **a Region 2 tartományban**, ami kis deformációt jelez a tekercs geometriában: **„K” jelű ellipszis területénél**.

A Region 3 és Region 4 tartományokban nincs eltérés a görbék között, vagyis mindkét tekercs jó állapotú.

FRA eredmények: fázis-fázis összehasonlítás JÓ ÁLLAPOTÚ TRAFÓNÁL



2. Eset tanulmány: hibás trafó

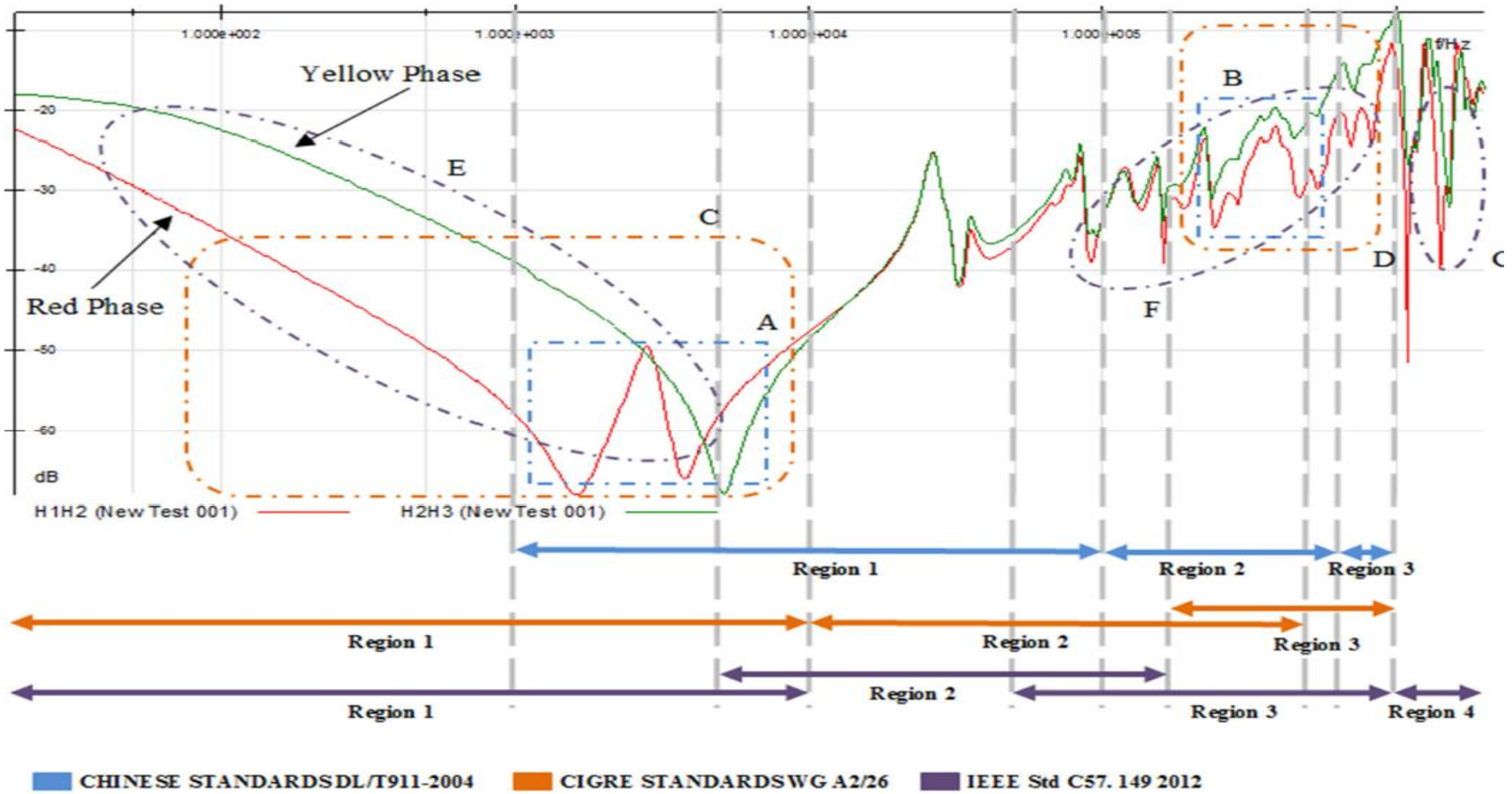
Ebben az esetben rossz állapotú trafó fázis-fázis FRA adatai kerültek összehasonlításra három különböző szabvány szerint.

A kínai szabvány szerint a Region 1 tartományban lévő eltérés azt jelzi, hogy a Sárga fázisban **nagy deformáció van az „A” jelű téglalap területén.**

A „B” téglalap szerint kis eltérés a fázisok között kis tekercs deformációt jelez.

A kínai szabvány értelmezése szerint bizonyított, hogy a Sárga fázisnál a tapasztalat szerint tekercs deformáció van.

FRA eredmények: fázis-fázis összehasonlítás rossz állapotú trafónál



A **CIGRE** szerint a **Region 1** tartományban a görbe jelentős mágneses kör és vasmag hibát jelez a Sárga fázisnál a „C” téglalap területén.

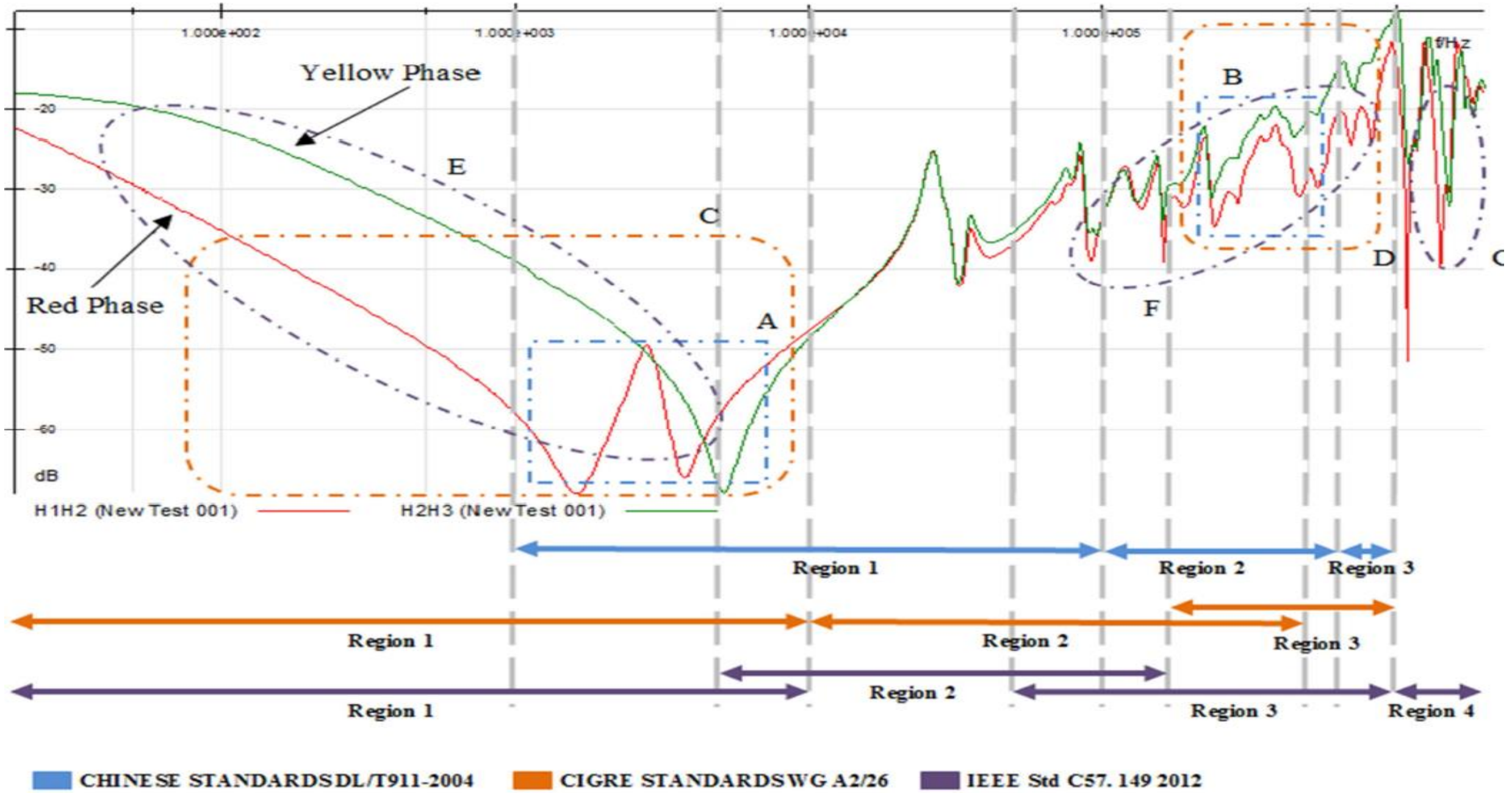
A „D” jelű téglalap területe szerint kis axiális tekercs deformáció vagy elmozdulás lehet. A **CIGRE** azt jelzi, hogy a Sárga fázisnál axiális deformáció és vasmag probléma detektálható.

Az **IEEE** szerint a **Region 1** nagy eltérést jelez a Píros és a Sárga fázisnál az „E” területnél, ami vasmag hibát és menetzárlatot jelez. A **Region 4** tartományban nagy eltérés van a „G” területen.

A **Region 4** hiba az átmeneti ellenállás, tekercs menet vagy nyitott tekercset jelent.

Kisebb eltérés látható a **Region 3** tartományban az „F” jelű területnél és az **IEEE** szerint a **Region 3** hiba axiális tekercs deformációnál jelenik meg, vagy általános tekercs változásnál, vagy érintkezési ellenállás növekedésnél, vagy menetzárlatnál, vagy nyitott tekercsnél.

FRA eredmények: fázis-fázis összehasonlítás rossz állapotú trafónál



Tab.3: Correlation efficient of winding loose FRA lines

fault location	winding loose	d=1mm	d=2mm
whole frequency band	0.997454	0.994843	0.988204
low frequency band	0.999657	0.997563	0.994014
middle frequency band	0.999934	0.999794	0.999236
high frequency band	0.991148	0.985003	0.968413
R_{MF} / R_{LF}	1.00028	1.00224	1.00525
R_{HF} / R_{LF}	0.99149	0.98741	0.97424

Tab.4: Mean square deviation of winding loose FRA lines

fault location	winding loose	d=1mm	d=2mm
whole frequency band	1.448415	2.155938	3.429761
low frequency band	0.706844	1.904525	2.960307
middle frequency band	0.478289	1.019811	2.049807
high frequency band	2.374527	3.152178	4.847262
E_{MF} / E_{LF}	0.6767	0.5355	0.6924
E_{HF} / E_{LF}	3.3593	1.6551	1.6374

Kínai szabvány szerinti MENNYISÉGI kiértékelés

-A kínai szabvány szerint az állapot a **referencia és a mért görbék alapján** kerül leírásra.

-A mért eredményekből egy **„korrelációs együtthatót”** és **„átlagos négyzetes eltérést”** (szórás négyzet) számolnak.

-A korreláció együttható **két görbe hasonlóságára** jellemző. A négyzetes szórás pedig **két görbe közötti eltérésre jellemző.**

Konklúziók

- **Az FRA technikára van szabvány, így manapság a leghatékonyabb módszer a trafók tekercs deformációjának a detektálására.**
- **FRA technikát gyakran használják mind a gyárban, mind a helyszínen.**
- **A pontosabb diagnózishoz kombinálhatjuk a spektrumgörbét, a korrelációs tényezőt, és az átlagos négyzetes eltérését különböző spektrum tartományokban (kínai szabvány).**
- **Az FRA még eléggé „sebezhető” eljárás. Szükség lenne egy kiértékelési algoritmusra, az „üzemzavar veszélyes” határértékre, stb.**
- **Az FRA mára már egy elfogadott mérési módszer, vannak szabványok (IEC, IEEE, kínai), azonban az eredmények kiértékelése még most is fontos kutatási téma.**
- **Jelenleg, a főbb erőfeszítések az FRA görbék korrekt kiértékelést célozzák meg, hogy megfelelő hatékonysággal becsülhessük a trafótekercsek mechanikai állapotát.**

Az FRA kiértékeléseknél **egyetértés** van a frekvencia válaszok és a mérést befolyásoló tényezők viszonylatában.

A **kiválasztott és bemutatott esettanulmányok**, mint **referencia példák** lehetnek, hogyan használható az FRA technika mechanikai elmozdulások detektálására.

A **kutatóintézeti, akadémiai hozzájárulások** **hasznos kiegészítések** a labor kutatások és numerikus modellezés területén.

Az akadémiai kutatásokra és kiválasztott esettanulmányokra alapozva, **néhány index nagyon ígéretes további kutatásokra**.

A WG javaslata:

A CIGRE **folytassa**, hogy fórumot ad az FRA esettanulmányok megosztásának (workshop, preferential subjects).

A nemzetközi trafós egyesületek használják a **legígéretesebb indexeket** az FRA technika továbbfejlesztésére.

Akadémiai intézetek **folytassák** az FRA-ra vonatkozó támogató kutatásokat.

**Köszönöm a
figyelmet!**



Trafó tekercsek helyettesítő ábrázolása elemi koncentrált blokkokkal