

Článek

Zkušenosti s praktickou aplikací analýzy SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) na výkonových transformátorech

Autoři

Dr. A. Kraetge – OMICRON electronics, Německo

Dr. W. Guo – OMICRON electronics, Austrálie

Dr. M. Krüger, M. Raedler – OMICRON electronics, Rakousko

Zkušenosti s praktickou aplikací analýzy SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) na výkonových transformátorech

Analýza SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) se ukázala jako výkonná a citlivá metoda k vyhodnocení mechanické a elektrické integrity aktivní vnitřní části transformátorů. Jedinou metodou lze provádět neinvazivní hodnocení jádra, vinutí, vedení, kontaktů a do určité míry také upínacích a opěrných struktur, takže jde o jednu z nejucelenějších metod měření používaných na transformátorech.

Hodnocení SFRA se zakládá na měření funkcí elektrického přenosu u všech testovaných vinutí ve vysokofrekvenčním rozsahu. V tomto článku je tento princip krátce popsán. Ačkoli tato metoda je závislá na velikosti a složitosti testovaného transformátoru, což rovněž platí i pro všechny ostatní diagnostické metody. Je tato metoda obecně bezpečná, jednoduchá a rychle použitelná. Proto je SFRA upřednostňovanou metodou pro první analýzu stavu transformátorů po incidentech, jako je plynový alarm, Buchholz, sepnutí ochrany nebo zkratovaný obvod atd.

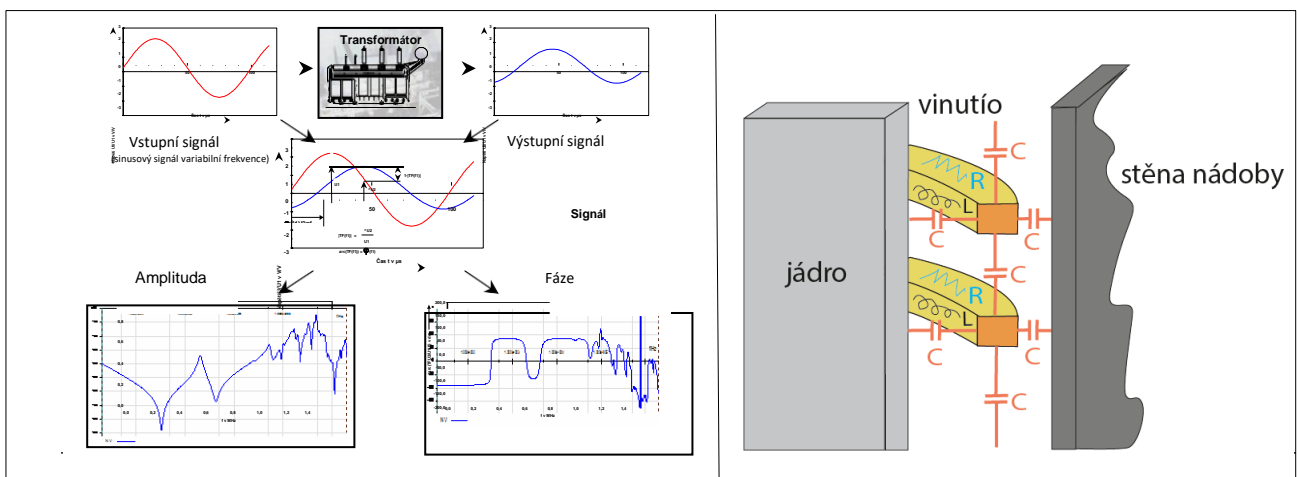
Na druhé straně se zdá, že k chybám manipulace a obsluhy dochází při testu SFRA častěji než u jiných metod, protože je nutné zvážit vysokofrekvenční aspekty, které vyžadují další vyškolení zkušebních techniků. Tyto chyby často vedou k „falešným negativním hodnocením“, kdy je zdravý transformátor identifikován jako poškozený. Organizace Cigré IEEE si to uvědomila, a proto vyvinula standardy pomáhající uživatelům předcházet chybám měření. Organizace IEC nakonec publikovala příslušnou normu v roce 2012, aby standardizovala aplikaci, procedury a dokumentaci. Pojednání předložil odborník, který je spoluautorem všech tří dokumentů a bude sumarizovat jejich obsah a vývoj v rámci tohoto odvětví od okamžiku jejich uveřejnění.

Výše zmíněná témata mají být chápána jen jako uvedení do problematiky. V hlavní části se zaměříme na různé aspekty praktické aplikace SFRA a případové studie. Pojednáme o různých zdrojích referenčních dat a jejich významu. Zmíníme nejistoty a rady, jak je řešit. Zaměříme se na volbu typů testu pro měření bez stávajících referenčních dat. Zmíníme informace o manipulaci s daty z testů. Nakonec shrneme zásady získané z velkého množství úspěšných měření, aby čtenář mohl dosahovat vysoké míry opakovatelnosti.

Úvod

Deregulace trhu s elektrickou energií znamená vyšší ekonomický tlak, který vyžaduje omezení servisu a snížení nákladů na údržbu. Na druhé straně máme po celém světě staré a stárnoucí flotily transformátorů, které jsou v provozu při rostoucích zátěžích [1]. Proto se diagnostika tohoto zařízení stala obecně důležitá, a to především pro strategické nebo zvláště rizikové transformátory. Za několik posledních let se na celém světě odehrál rychlý technický rozvoj v různých oblastech měření, získávání dat, jejich ukládání a analýzy. Analýza SFRA (Sweep Frequency Response Analysis) se ukázala jako výkonná, nedestruktivní a citlivá metoda k vyhodnocení mechanické integrity jádra, vinutí a upínacích struktur ve výkonových transformátorech měřením funkcí elektrického přenosu v širokém frekvenčním rozsahu. To se obvykle provádí injektáží nízkonapěťového signálu s variabilní frekvencí do jedné svorky vinutí transformátoru a měřením signálu odezvy na jiné svorce (viz obr. 1, vlevo). Obvykle se to podle pokynů provádí na všech dostupných vinutích. Porovnání vstupních a výstupních signálů generuje frekvenční odezvu, kterou lze porovnat s referenčními daty (viz kapitolu 3).

Sestava jádra a vinutí výkonových transformátorů tvoří složitou elektrickou kombinaci odporů, vlastních indukci, kapacitancí vůči zemi, spojených induktancí a řady kapacitancí, jak je znázorněno v pravé části obrázku 1. Frekvenční odezva takové sítě je jedinečná, a proto může být považována za jakýsi identifikační otisk.



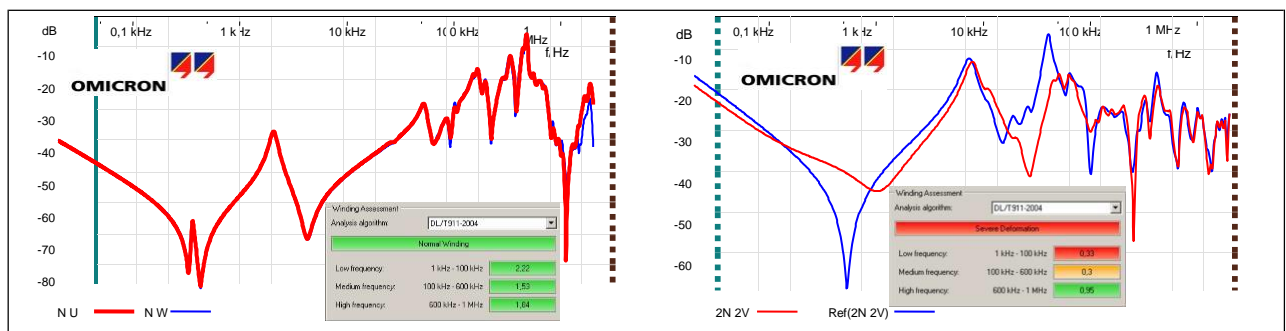
Obrázek 1
Princip funkce SFRA (vlevo) a chování zjednodušené sítě aktivní části transformátoru (vpravo)

Geometrické změny v prvcích a mezi nimi způsobí odchylky v jejich frekvenční odezvě. Rozdíly mezi otiskem FRA a výsledkem skutečného měření jsou indikací polohových nebo elektrických změn vnitřních komponent. Různé chybové režimy ovlivňují různé části frekvenčního rozsahu a obvykle mohou být od sebe odlišeny. Praktické zkušenosti a také vědecká zkoumání ukazují, že žádná jiná diagnostická testovací metoda nemůže poskytnout takový rozsah spolehlivých informací o mechanickém stavu aktivní části transformátoru.

Normy a návody

První povinná norma na světě byla ustanovena 1.6.2005 v Číně. Tato norma nazvaná DL 911/2004 se vztahuje pouze na měření SFRA a předpokládá, že měření IFRA (impulzní FRA) jsou v Číně neobvyklá. Zabývá se principy testů, požadavky na testovací přístroje, testovací metody a analýzou výsledků. Standardní informace se týkají pouze měření v rozpojených obvodech end-to-end (viz levá část obr. 6), přičemž k měření směru na vinutí zapojeném do hvězdy norma vyžaduje injekci signálu do neutrální svorky a měření odezvy na fázové svorce. Toto nařízení o signálech se mezitím stalo docela neobvyklé, hlavně kvůli obrácenému směru vyžadovanému normami IEEE a IEC. Norma vyhodnocuje frekvenční pásmo mezi 1 kHz a 1 MHz a je jedinečná v tom, že uvádí matematické pravidlo k tomu, jak posoudit výsledky testu na základě výpočtu kovariancí [2].

Dále jsou uvedeny dva příklady toho, jak toto hodnocení použít. Nejprve se porovnávají primární fáze transformátoru starého 36 let (40 MVA) po renovaci (obr. 2, vlevo). Obě trasy vykazují dobrou shodu, což je v souladu se známým stavem vinutí. Hodnocení podle této čínské normy potvrzuje toto hodnocení (zelené). Druhý příklad napravo ukazuje výsledky testu primárního vinutí (střední fáze) dvou sesterských transformátorů 63 MVA. Jeden transformátor neprošel dielektrickým testem. Důvodem je to, že má zkratované závity vinutí, které jsou jasně vidět na měření SFRA a potvrzeny čínským hodnocením (červená označuje závažný problém).



Obrázek 2

Hodnotící nástroj potvrzuje zdravý stav (vlevo); závada je jasně zjištěna hodnotícím nástrojem (vpravo)

V roce 2002 vytvořila organizace IEEE tým (Task Force - TF) zaměřený na FRA a následně roku 2004 ustanovila pracovní skupinu (Working Group - WG). Tato WG byla zaměřena na vývoj pro aplikaci a interpretaci metody FRA pro olejové transformátory. Nakonec vše bylo publikováno v roce 2012 jako návod C 57.149, návod IEEE pro aplikaci a interpretaci analýzy frekvenční odezvy pro olejové transformátory [3]. Stejně jako u čínské normy, organizace IEEE doporučuje testovací systém tří vedení pro „zdroj“, „referenci“ a „měření“. To je v souladu s běžnými vědeckými znalostmi a je podporováno všemi výrobci testovacích nástrojů SFRA. Návod IEEE doporučuje testy na zkraty obvodů (viz obr. 6, vpravo) jako doplněk testů doporučených v dokumentu DL 911/2004. Důležitým dalším vývojem standardu je specifikace dat, která se doporučuje ukládat

společně se surovými daty z měření. Nakonec jsou uvedeny typické režimy selhání transformátorů a jejich projevy ve výsledcích FRA. Další informace o této práci lze nalézt na IEEE Transformers Committee domovská stránka: <http://www.transformerscommittee.org/>

Výbor Cigré Study Committee (SC) A2 – Transformers se v roce 2003 rozhodl vytvořit pracovní skupinu zaměřenou na aplikaci metody FRA na výkonové transformátory. Tato WG A2.26 s názvem “Mechanical Condition Assessment of Transformer Windings using Frequency Response Analysis (FRA)” začala svou práci v roce 2004 a skončila publikací zprávy Cigré č. 342 v dubnu 2008. Během tohoto období tato WG kromě pravidelných setkání zorganizovala dva workshopy zaměřené na FRA testování. Během těchto workshopů bylo provedeno mnoho praktických zkoumání, která vedla k lepšímu porozumění rozdílů v postupech FRA. Jako ovlivňující faktor s nejvyšší důležitostí se prokázala technika připojení (postup připojení kabelů). Proto byla doporučena standardizace postupu připojení kabelů, aby se využila demonstrovatelná citlivost tohoto vysokofrekvenčního měření. Výsledná technická brožura [4] je cenným zdrojem informací a užitečným návodem pro praktickou aplikaci metody FRA. Další informace o této práci lze nalézt na domovské stránce Cigré A2: <http://www.cigre-a2.org/>

Na základě tohoto návodu Cigré, pověřila organizace IEC v roce 2009 projektový tým tím, aby vyvinul normu k měření frekvenční odezvy jako součást řady norem IEC 60076. V roce 2012 byla tato norma nakonec publikována jako část 18 [5]. Standardizuje požadavky, proceduru a manipulaci s daty FRA jako nepovinné, ale doporučované postupy při testu. Jsou uvedeny také pokyny ohledně faktorů, které mají vliv na měření, a ohledně interpretace dat z testů. Norma zavedla datový formát založený na XML, přičemž se soustředí na možnost výměny dat z testů měřených s různými testovacími nástroji. Mezitím došlo k tomu, že všichni hlavní výrobci testovacích zařízení umožňují uživatelům měřit a importovat výsledky testů v tomto formátu, který obecně lze považovat za hlavní vylepšení metody FRA. Dokument je dostupný zde: <http://www.iec.ch/search/?q=60076-18>

Na základě všech dříve uvedených dokumentů lze nyní provádět testy FRA jako standardizované, a tedy porovnatelné. Autoři silně doporučují řídit se těmito publikovanými návody. Současná pracovní skupina Cigré WG A2.53, nazvaná Objective interpretation methodology for the mechanical condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA), pracuje na zlepšování interpretace výsledků testů FRA. Vybízíme uživatele FRA, aby této pracovní skupině dodávaly případy selhání. Další informace vám poskytne zástupce Cigré A2 ve vaší zemi.

Nakonec bychom měli uvést, že měření FRA na poli frekvencí, obvykle označované jako SFRA (sweep frequency response analysis), se na celém světě prosadilo jako preferovaná metoda, takže výraz FRA obvykle znamená totéž jako SFRA.

Praktické aspekty testování SFRA

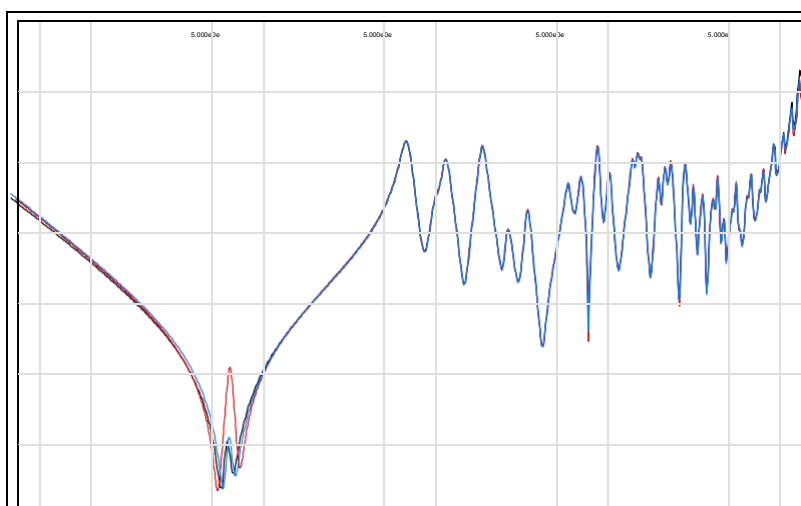
SFRA je komparativní metoda měření. To znamená, že výsledky skutečných testů – obvykle sada křivek (hlavně amplituda v dB v průběhu frekvence) představujících všechna, co nejvíce oddělená vinutí transformátoru – jsou porovnávány s referenčními daty či daty z výroby.

K hodnocení naměřených hodnot se obvykle využívají tři metody:

- Založena na čase (aktuální výsledky FRA se porovnávají s předchozími výsledky stejné jednotky)
- Založena na typu (výsledky FRA jednoho transformátoru se porovnávají s výsledky z jiného transformátoru stejné konstrukce)
- Porovnání fází (výsledky FRA jedné fáze se porovnávají s výsledky z jiných fází téhož transformátoru)

Prvním krokem před měřením musí být tedy zodpovězení otázky: Jsou k dispozici referenční data? Jestliže bylo dříve na tomto transformátoru provedeno měření FRA, výsledky takového měření byste měli zavést do softwaru daného nástroje FRA a před plánovaným testem byste je měli analyzovat. Během této činnosti byste měli zkontrolovat konzistenci stávajících dat a opravit dokumentaci. Klíčovým faktorem dokumentace je způsob, jak byla vytvořena připojení. Z praktického pohledu se jako nejlepší postup ukázalo ukládání fotografií podrobností připojení společně s daty z měření. Norma IEC 60076-18 uvádí takové snímky jako povinné. To je důležité k dosažení maximálního možného stupně opakovatelnosti tím, že vytváříte stejné uspořádání pro měření.

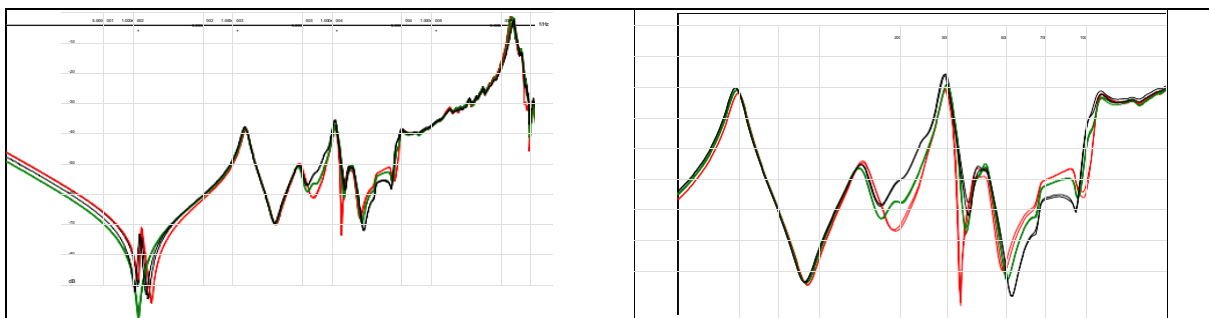
Jestliže data mají spolehlivou kvalitu, jejich analýza umožňuje zkušebnímu technikovi získat představu o „očekávaných výsledcích“, což je velmi důležité k eliminaci chyb měření. Pro plánovaný test byste měli plánovat stejná měření za stejných podmínek (např. poloha měniče odbočky). Podle důvodu, proč se provádí aktuální test, mohou být nutná další měření, protože jednotlivé různé typy měření SFRA se nejlépe hodí pro různá zkoumání. Tato rozhodnutí by měla být jasně učiněna před začátkem měření, protože časový tlak je obvykle jednou z nejčastějších okolností při testech transformátorů. Obrázek 3 ukazuje příklad porovnání na základě času u transformátorů 8 MVA (vždy VN fáze 3). Černá křivka byla naměřena v 04/2006, červená křivka v 5/2007 kdežto modrá křivka je z 11/2008.



Obrázek 3
Porovnání na základě času: Tři testy stejné fáze mezi dubnem 2006 a listopadem 2008

Oblast jádra pod 1 kHz ukazuje odchylky kvůli rozdílným stádiím remanence jádra, což je přirozené, jestliže je transformátor takto testován. Chcete-li se těmto rozdílům vyhnout, doporučujeme před měřením provést demagnetizaci jádra transformátoru. Pro frekvence mezi 1 kHz a 1,5 MHz mají testy dobrou shodu, což je indikace nezměněné geometrie vnitřní části transformátoru a tedy zdravého stavu testovaného vinutí. Předpokládáme, že první test byl proveden na fázi, která je také ve zdravém stavu. To byl případ tohoto transformátoru.

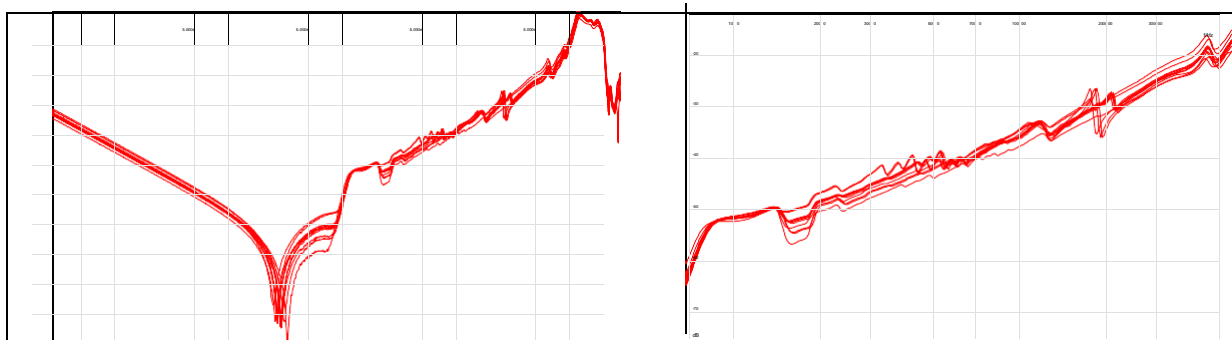
Jestliže nejsou k dispozici žádná historická data příslušného transformátoru, obvyklé a nejužitečnější je použít data SFRA z transformátorů stejného typu („sesterských“). Manipulace s daty je obvykle stejná, jak je popsáno pro porovnání založené na čase. Avšak drobné odchylky mezi křivkami „sesterských“ transformátorů nelze normálně vyloučit. Obrázky 4 ukazují příklad úspěšného porovnání na základě typu dvou transformátorů 30 MVA. Z překrývání dat VN vinutí je zjevné, že si související křivky (stejně barvy pro každou fázi) velmi dobře odpovídají. Když vezmeme v úvahu, že je vysoce nepravděpodobné, že by dva transformátory měly přesně stejný druh mechanické závady, dobrá shoda výsledků je vlastně dobrou indikací zdravého stavu obou jednotek. Výsledek každé fáze je zobrazen stejnou barvou pro otisk a druhý test.



Obrázek 4
Porovnání na základě typu: VN fáze dvou sesterských jednotek vykazující dobrou shodu (vlevo), vpravo zvětšené 3 kHz – 200 kHz

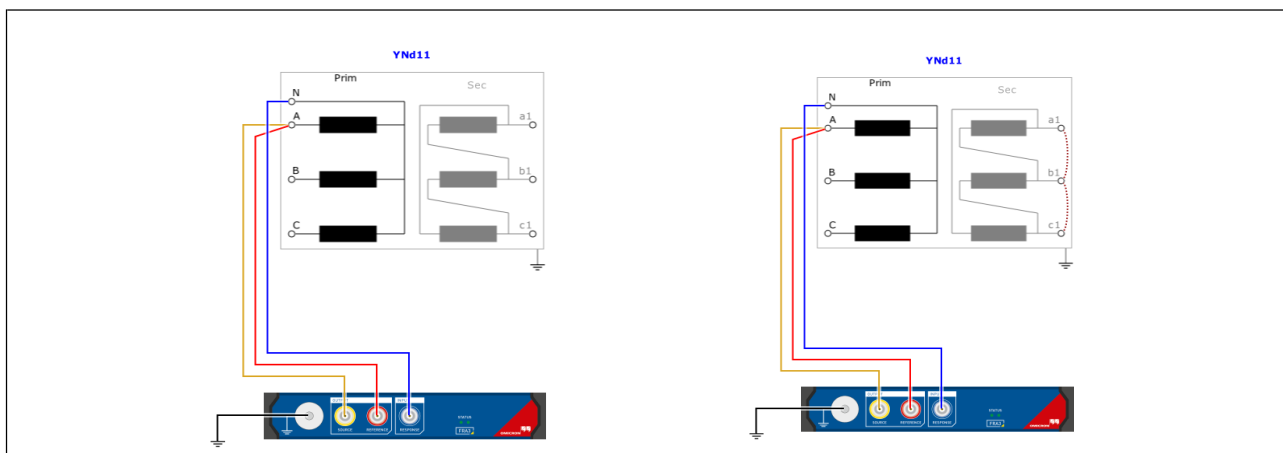
Je však nutné přiznat, že stejně specifikované transformátory nevykazují v každém případě přesně stejné frekvenční odezvy. Příklad různých výsledků SFRA (20 Hz - 2 MHz) na identicky specifikovaných jednofázových blokových transformátorech 60 MVA je uveden na obrázku 5. Ačkoli všechny jednotky byly v dobrém stavu, výsledky SFRA se neshodují. Levá strana obrázku uvádí zvětšenou oblast neshody ve frekvenčním rozsahu od 5 kHz do 550 kHz. Je zjevné, že konstrukce vinutí byla během výroby této várky transformátorů změněna. Toto zjištění výrobce potvrdil.

Tento příklad ukazuje, že neshoda výsledků SFRA při porovnání založeném na typu nemusí nutně znamenat, že jeden nebo oba transformátory jsou poškozeny. V takových případech doporučujeme použít více než jeden referenční test, pokud máte k dispozici data, nebo konzultovat s výrobcem transformátoru.



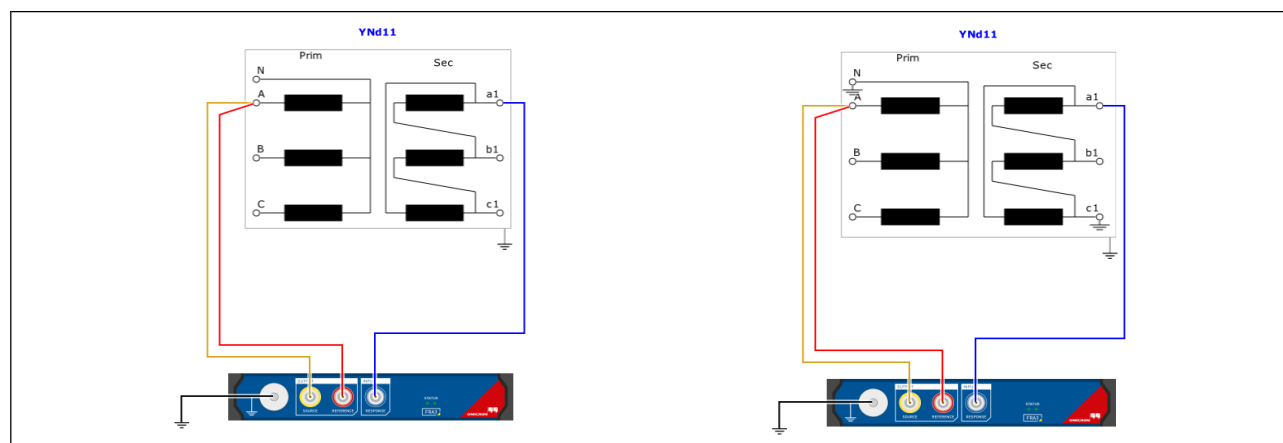
Obrázek 5
Porovnání na základě typu: Odezvy VN vinutí 10 jednofázových sesterských transformátorů uvádějících neshodné výsledky

Jestliže nejsou k dispozici žádná referenční data, sada testů se má naplánovat podle mezinárodních standardů s ohledem na cíle testu (otisk, zjištění závady, hodnocení přenosu atd.). Nejčastějším měřením je test end-to-end se všemi netestovanými svorkami ponechanými jako plovoucí. Tyto křivky přinášejí nejvíce informací o jádře a vinutí a jsou tedy nejdůležitějším a nejobvyklejším typem testů. Levá část obrázku 6 zobrazuje na schématu princip měření. Jak vyžaduje norma IEC, zdroj signálu a referenční měřicí kanál jsou připojeny ke svorce vedení, zatímco kanál měření odezvy je připojen k neutrálu. Obrázek 6 napravo uvádí test end-to-end se zapojením vinutí nakrátko (do zkratu). Tak je zamezeno vlivu jádra (magnetizující indukance) a namísto toho je zde typický průtok. Při vyšších frekvencích, když jsou informace o struktuře vinutí stejné, dávají oba typy testů end-to-end stejné výsledky. Je běžnou praxí nezahrnovat neutral sekundárního vinutí do zapojení nakrátko. Je nutné zmínit, že norma IEC vyžaduje dvě měření pro vinutí s OLTC – na odbočce s nejvyšším počtem závitů v obvodu a na odbočce, kde je příslušné vinutí mimo obvod. Tato metoda dává šanci rozlišit mezi chybami ve vinutí odbočky a hlavním vinutím, které mohou být důležité při rozhodování o likvidaci či opravě nebo o tom, zda jednotku lze opravit na místě či ji přepravit zpět do továrny.



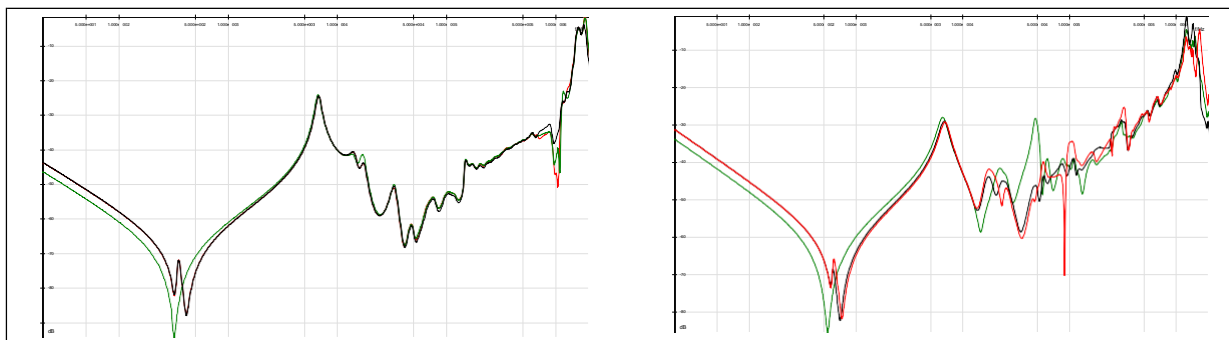
Obrázek 6
Princip testů end-to-end – vlevo test s otevřeným obvodem, vpravo test obvodem zapojeným nakrátko

Jiné testy mohou být testy kapacity mezi vinutími (obr. 7, vlevo), nebo poměrně neobvyklý test indukčnosti mezi vinutími. Měření kapacity mezi vinutími se zdají jako slibná díky své vysoké citlivosti při detekci radiálních deformací. Test indukce mezi vinutími je komplementární k testu měření převodu transformátoru (TTR – Transformer Turns Ratio) v nízkofrekvenčním rozsahu. Výběr typu testů, které mají být provedeny, je stejně věcí dostupného času na testování. Pro definici obecného nastavení bylo prokázáno, že frekvenční rozsah mezi 20 Hz a 2 MHz je obvykle dostatečný a je to také požadovaný frekvenční rozsah podle normy IEC 60076-18. Pokud jde o další používání skutečných dat jako referencí pro budoucí měření musíme znovu zdůraznit, že pro měření SFRA je klíčová přesná dokumentace.



Obrázek 7
Princip testů mezi vinutími – vlevo kapacita, vpravo indukčnost (zapojení se neuzemňuje)

Bez referenčních dat je obvyklé vzájemně porovnávat fáze transformátoru. Pro třífázové transformátory musíme uvést, že střední fáze se obvykle liší od vnějších fází v prostoru jádra (až do zobrazení v kHz) a také v oblasti vyšších frekvencí, což souvisí se strukturou testovaného vinutí. Jako příklad uvádíme obrázek 8, kde jsou vidět odezvy primárního vinutí transformátoru 350-MVA GSU. Je vidět, že střední fáze (zelená křivka) se lehce odchyľuje od ostatních fází (černá a červená). Navzdory tomu je zjevné, že rezonance a anti rezonance jsou v blízké shodě, což je dobrým znakem toho, že vinutí je v dobrém stavu. Podle zkušeností autorů platí, že cca 60 % všech testů SFRA lze hodnotit pouze na základě porovnání fází. Je však třeba také zmínit, že i dobrá vinutí nemusejí dobře korelovat kvůli jejich specifické konstrukci. V takových případech je nutné další zkoumání (např. porovnání na základě typu). Lze odhadovat, že cca 90 % všech měření SFRA lze vyhodnotit, aniž by byla dostupná data otisku testovaného objektu. V pravé části obrázku 8 je uveden příklad nově postaveného transformátoru 63 MVA. Primární vinutí má rozdílné odezvy, třebaže byl ověřen jejich zdravý stav. Častěji než u primárního vinutí lze tento efekt pozorovat u sekundárního nebo terciárního vinutí.

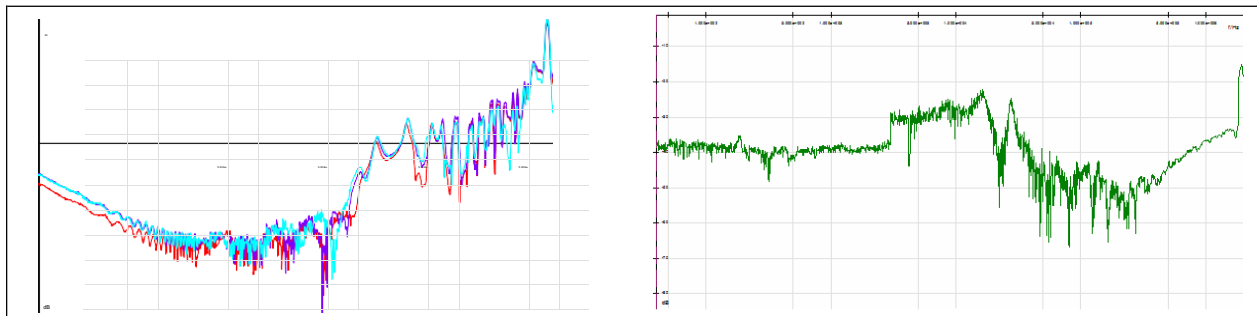


Obrázek 8
Porovnání fází primárního vinutí ve zdravém stavu s dobrou shodou (vlevo) a s neodpovídajícími výsledky (vpravo)

Pravidla k dosažení opakovatelnosti

Nakonec shrneme pokyny odvozené od velkého množství úspěšných měření, aby také čtenář dosáhl dobré míry opakovatelnosti. To je potřeba, protože všechny typy hodnocení vysvětlené v kapitole 3 jsou založené na schopnosti přesně reprodukovat výsledky měření za stejných podmínek. Bez toho je často velmi obtížné nebo dokonce nemožné rozlišit mezi chybami měření a skutečným poškozením vnitřní části transformátoru.

- Všechna připojení byste měli z transformátoru odstranit, kromě uzemnění nádoby a pomocných připojení.
- Kontakty objímek byste měli vyčistit a připojovací svorky pevně dotáhnout, abyste zajistili spolehlivý elektrický kontakt.
- Měli byste použít tři stíněné vysokofrekvenční kabely (obvykle koaxiální kabely).
- Musí být zajištěno, aby zemnicí přípojky stínění měřicího kabelu neměly elektrický kontakt s kontakty svorek.
- Zemnicí přípojky testovacích vedení musejí mít nízkou induktanci (široké splétané kabely s velkým povrchem, vyrobené z velkého počtu malých vodičů ke snížení povrchového efektu při vyšších frekvencích).
- Zemnicí přípojka k základně objímky (referenční potenciál je nádoba transformátoru) by měla být co nejkratší a s co nejmenší dosažitelnou smyčkou.
- Je velmi důležité zajistit spolehlivý kontakt mezi zemnicí přípojkou a nádobou. Obvykle je tento kontakt na základně objímky nebo na jejích upevňovacích šroubech. Je nutné odstranit nátěr či rez. Pokud to neprovedete, může to způsobit mnoho chyb měření.
- Podrobné informace o uspořádání testu byste měli uložit spolu s daty testu. To pomůže při reprodukci měření pro budoucí testy. Podle normy IEC jsou podrobné fotografie povinné a autoři je velmi doporučují.
- Všechny výsledky testu byste měli okamžitě kontrolovat a porovnat s očekávanými a dostupnými referencemi. Téměř každá křivka šumu indikuje nesprávné uzemnění. Obrázek 9 ukazuje dva typické příklady tohoto jevu. Je důležité rozpoznat chyby měření na místě a po provedení požadovaných korekcí opakovat problematický test.



Obrázek 9
Typické příklady chyb měření

Aplikace SFRA během přepravy transformátoru

Vyhodnocení přepravy transformátorů je stále populárnější aplikace metody SFRA. To je rozumné, protože metoda SFRA může poskytnout hluboké informace o jádru, vinutí a strukturách svorek, a to v jedné sadě testů. Všechny tyto části jsou citlivé na poškození při přepravě.

Stejně jako u všech jiných aplikací SFRA je důležité provádět test za stejných podmínek, abyste získali spolehlivé výsledky. Proto by měl být první test proveden na transformátoru v jeho přepravní konfiguraci. Transformátor bude obvykle vybaven deskami zakrývajícími objímky nebo přepravními objímkami, které lze důrazně doporučit, aby testování bylo snadnější, a bez oleje (v závislosti na velikosti a omezeních). Je tedy zřejmé, že normální výchozí data z továrny nebo z testů otisku na místě nelze za tímto účelem použít, protože výsledky se budou od sebe lišit. Na druhé straně je nutné si uvědomit, že výsledky z přepravních testů nelze obvykle použít jako výchozí data pro budoucí testy v provozním stavu. První přepravní hodnotící test by měl být proveden jako end-to-end měření na otevřeném obvodu se všemi ostatními plovoucími svorkami. Měření při zapojení nakrátko nedokáže zobrazit oblast jádra. Test by měl být proveden s nastavením logaritmického měření, protože lineární škálování nebude dostatečně kryt oblast nejnižší frekvence související s magnetickým jádrem, které je zvláště zranitelné při přepravě.

Po počátečním testu, před zahájením přepravy, lze při převozu kdykoli provést kontrolní testy. Je důležité pamatovat na to, že test SFRA by měl být poslední elektrický test před přepravou a první test po přepravě. Protože tento test se provádí přivedením nízkého napětí, obvykle 10 voltů, je neinvazivní a není nebezpečný. Jiné testy, zvláště DC testy (např. test odporu vinutí), mění stav magnetizace jádra a neumožňují spolehlivé vyhodnocení integrity jádra, takže byste se takovým testům měli vyhýbat. Autoři jasně doporučují provést demagnetizaci transformátoru před odesláním, protože to je nejlepší způsob, jak se zbavit všech nejistot souvisejících s remanencí. Poškození jádra je jedním z nejobvyklejších škod z přepravy, takže tato nízkofrekvenční oblast křivek SFRA by měla být zkoumána s obzvláštní pečlivostí, zvláště po zjištění nárazů ze záznamníků. Stav remanence jádra by měl být rozhodně zaznamenán do dokumentace testu. Totéž platí pro polohu měniče odbočky a hladinu oleje nebo dokonce jeho absenci. Jestliže byl test proveden krátce po vypuštění oleje, tato skutečnost by měla být také zaznamenána, protože zbytkový olej má účinek v izolaci. Pokud by na místě byl proveden opětovný test bez oleje, mohly by výsledky být neprůkazné, protože zbytkový olej mohl při přepravě odkapat, což by vedlo ke změně kapacity a tedy k lehce posunutým křivkám SFRA.

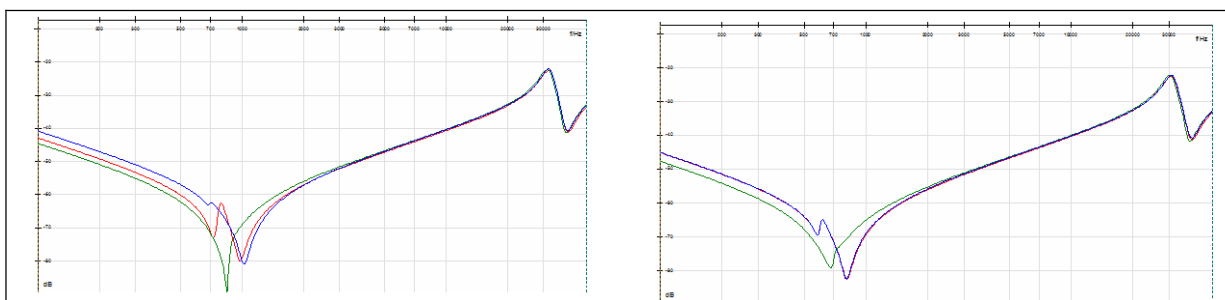
Kromě toho je důležité, aby přepravní konfigurace transformátoru byla dobře zdokumentována a dostupná jinému zkušebnímu personálu, který bude muset provést opakovaná měření. Možná bude nutné uvést a zaznamenat více než jednu konfiguraci pro přepravu, protože transformátor mohl projít několika způsoby přepravy, např. nákladním vozidlem, lodí, po železnici, vykládka jeřábem atd. Každý z těchto způsobů přepravy může transformátor vystavit nežádoucímu fyzickému nárazu. Testování před a po jednotlivých druzích přepravy, které mají jiné zodpovědné subjekty, je prozíravé. Po přijetí transformátoru na jeho místo určení byste měli provést jeden poslední test v přepravní konfiguraci, abyste vyhodnotili přepravu. Jestliže tento test potvrdí zdravý stav transformátoru, měli byste provést závěrečný test SFRA se sestaveným transformátorem naplněným olejem, podle požadavků pro všechny jiné testy přijetí na místě (SAT) a uvedení do provozu, přičemž výsledky tohoto testu mají sloužit jako výchozí data či data otisku pro budoucí testování. Přestože to znamená trochu delší dobu instalace, hodnotu těchto dat otisku nelze docenit, protože tento test má hluboký význam. Ve všech případech se velmi doporučuje, abyste ofotografovali připojení mezi zařízeními FRA a objímkami, přičemž zvýrazněte uzemnění stíněných kabelů k nádobě.

V následujícím příkladu byly provedeny testy SFRA na řadě transformátorů po jejich přepravě z Evropy do Afriky. Hodnoty zjištěné záznamníkem nárazů byly podezřelé. Kromě toho byly zjištěny stopy po nárazech. Obrázek 10 ukazuje dva snímky podezřelé jednotky. Před odesláním nebyly provedeny žádné testy SFRA, ale naštěstí byla možná porovnání na základě typu a fází.



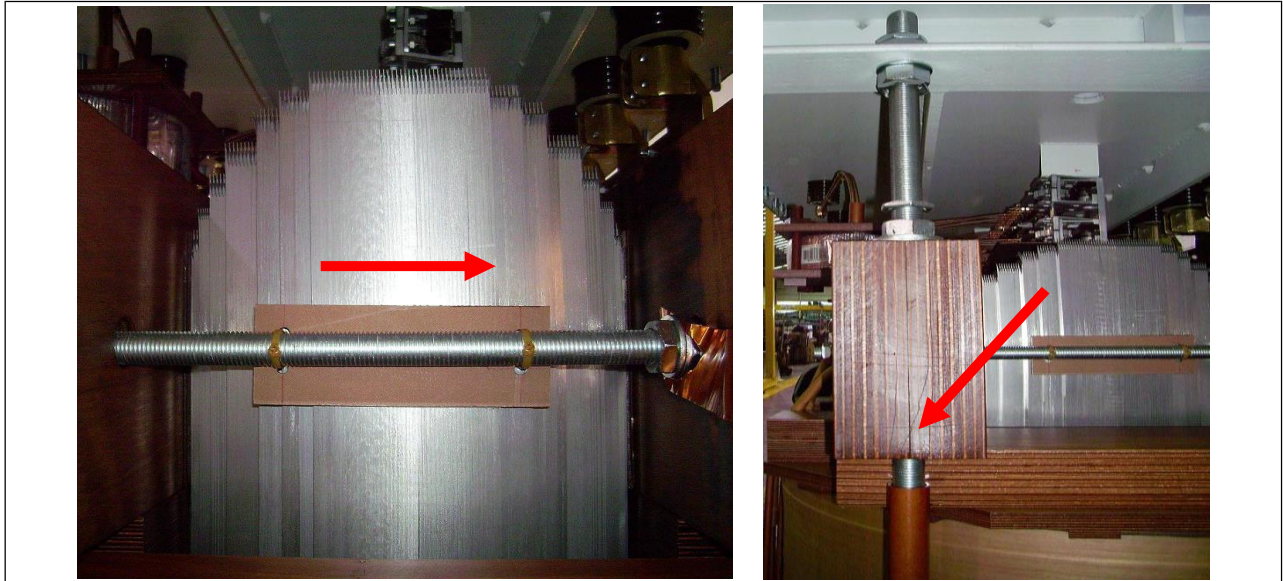
Obrázek 10
Stopy po nárazu ukazující na možné poškození transformátoru po jeho odeslání

Měření na levé straně obrázku 11 uvádí oblast jádra podezřelého transformátoru ve frekvenčním rozsahu 100 Hz – 50 kHz. Pro srovnání je napravo zobrazena sesterská jednotka s jádrem ve zdravém stavu, ve stejném frekvenčním rozsahu. Transformátor byl před odesláním demagnetizován, takže bylo možné čekat velmi dobrou shodu křivek vnějších fází a všechny transformátory stejného typu by měly vykazovat stejné chování v oblasti jádra pod 5 kHz. Je zjevné, že transformátor napravo má dokonalou shodu vnějších fází (červená a modrá). Odchylka střední fáze (zelená) je taková, jaká byla očekávána. Křivky nalevo jsou jiné – vnější fáze mají špatnou shodu. Křivka fáze 3, uvedená modrou barvou, má velmi nepravděpodobný tvar.



Obrázek 11
Porovnání podezřelého transformátoru (vlevo) se stejnou jednotkou (vpravo) na základě typu

Na základě výše uvedených výsledků a hodnot ze záznamníku nárazů jsme se rozhodli podezřelý transformátor otevřít a vizuálně zkontrolovat. Zjištění potvrdila hodnocení výsledků SFRA. Třetí větev jádra byla posunuta doprava. Příslušná upínací tyč byla ohnutá a horní dřevěný upínací rám byl částečně prasklý. Upínací tlak byl u příslušné fáze významně snížen. Transformátor byl nakonec odeslán výrobci k opravě.



Obrázek 12
Posunutá třetí větev jádra (vlevo), ohnutá upínací tyč a prasklý upínací rám (viz šipku) napravo

Závěry

SFRA je účinná metoda pro detekci a diagnostiku defektů v aktivní části výkonových transformátorů. Může poskytnout cenné informace o mechanickém i elektrickém stavu jádra, vinutí, vnitřních spojení a kontaktů. Žádná jiná jednotlivá metoda elektrického testování pro vyhodnocení stavu výkonových transformátorů nemůže poskytnout tuto škálu informací. Proto je SFRA stále populárnější testovací metodou. Hodnota dat otisku je stále oceňovanější uživateli po celém světě. Pro úspěšnou aplikaci SFRA je klíčová reprodukovatelnost. Při vytváření připojení je tedy podstatná maximální přesnost a pro úspěšnou aplikaci této hodnotné metody je zásadní přesná dokumentace.

Reference

- [1] W.H.Bartley, "Analysis of transformer failures", 36. Annual Conference of engineering insurers, Stockholm, 2003
- [2] The Electric Power Industry Standard of People's Republic of China, "Frequency Response Analysis on Winding Deformation of Power Transformers", Čína, 2005
- [3] IEEE Standards Association, "IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers", New York, 2012
- [4] Cigré WG A2/26, "Mechanical condition assessment of transformer windings using Frequency Response Analysis (FRA)", Technical Brochure 342, Paříž, 2008
- [5] IEC 60076-18, International Standard "Power transformers – Measurement of frequency response", IEC, Ženeva, 2012

Společnost OMICRON je mezinárodní společnost poskytující elektrotechnickému odvětví nová řešení v oblasti testování a diagnostiky. Produkty OMICRON umožňují uživatelům naprosto spolehlivě vyhodnotit stav primárního i sekundárního vybavení jejich systémů. Nabídka produktů je doplněna službami společnosti OMICRON v oblasti poradenství, uvádění do provozu, testování diagnostiky a školení.

Zákazníci ve více než 160 zemích spoléhají na schopnost společnosti OMICRON dodat nejmodernější technologii ve špičkové kvalitě. Na všech kontinentech máme servisní střediska, která disponují širokou znalostní bází a nabízejí zákazníkům skvělou podporu. Díky tomu všemu, spolu s rozsáhlou sítí prodejních partnerů, má naše společnost vedoucí postavení v elektrotechnickém průmyslu.

Požadujete-li další informace, publikace či kontaktní informace o našich kancelářích kdekoli na světě, navštivte laskavě naše webové stránky.