

ПРИЛОЖЕНИЕ НА ЧЕСТОТНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗА ОЦЕНКА НА ТЕХНИЧЕСКОТО СЪСТОЯНИЕ И ОТКРИВАНЕ НА ДЕФЕКТИ В СИЛОВИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Евтим Кърцелин, Александър Владимиров, Йоана Младенова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, София 1700, avladimirov@hhi-co.bg

РЕЗЮМЕ: Показана е приложимостта на честотните характеристики за оценка състоянието на силовите трансформатори

APPLICATION OF SWEEP FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS FOR EVALUATION OF THE TECHNICAL CONDITION AND FAULT DETECTION IN POWER TRANSFORMERS

Evtim Kartzelin, Aleksandar Vladimirov, Joana Mladenova

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, avladimirov@hhi-co.bg

ABSTRACT: Presented is method for evaluation of the technical condition of power transformers through sweep frequency response analysis

1. Въведение

В последните години се развива крупни аварии в енергийните системи на промишлено най-развитите страни в света. Независимо от вековния опит в разработването, производството и експлоатацията на мощни енергийни системи, за чието управление и контрол се използват върховите постижения в областта на промишлените технологии и изчислителната техника, възникването на такива крупни аварии в електроенергийните системи на тези държави са доказателство, че в тази област на науката има сериозни проблеми и нерешени задачи.

Силовите трансформатори са едни от най-скъпите съоръжения използвани при изграждането на електро-снабдителната система. Те се явяват основно звено в технологичната верига за пренасяне на електрическа енергия на големи разстояния с минимални загуби. Основен елемент са както на енергийната система на отделно взета страна, така и на съвместно работещи две и повече енергийни системи. Ето защо от надеждната работа на силовите трансформатори и качеството на преобразуване на електрическата енергия в тях зависи надеждността на енергийната система на всяка страна, качеството на електрооснабдяване на различните категории потребители и ефективността на нейното преобразуване и пренасяне.

Работата на силовите трансформатори и днес е съпроводена с редица специфични особености:

- силовите трансформатори се явяват източници на висши хармоници;
- силовите трансформатори са основен източник на

технологични загуби при преобразуване и пренасяне на електрическата енергия. Тези загуби нарастват с увеличаване на срока на експлоатацията, след протичането на различни аварийни режими при къси съединения, атмосферни и комутационни пренапрежения, след изпълнението на определен вид ремонти работи и др.;

- възникване на големи стойности на тока при включване на силовите трансформатори на празен ход. Тези стойности са съизмерими с токовете на късо съединение;
- изменение на електрическите и магнитни показатели и параметри в процеса на експлоатация на силовите трансформатори.

На 43^{та} научна сесия на СИГРЕ, проведена на 22-27 август 2010 г. в гр. Париж, е приет стратегически план за развитие на научните изследвания в областта на силовите трансформатори, в които са включени следните въпроси и задачи за изследване:

- методи за мониторинг и диагностика;
- методи за оценка на остатъчния ресурс;
- повишаване на безопасността при експлоатация;
- нови технологии за проектиране, производство и изпитване;
- електромагнитна съвместимост.

За осигуряване на висока експлоатационна надеждност на силовите трансформатори се извършва задължителен обем измервания през целият им жизнен цикъл:

- в процеса на тяхното производство;
- в процеса на тяхната експлоатация;
- след протичане на тежки аварийни режими в резултат

на къси съединения, на атмосферни и комутационни пренапрежения и др.

- след провеждане на ремонтни работи по тях.

Определянето на обема, избора на методите, техническите средства и периодичността на изпитване и проверка на силовите трансформатори през целият им жизнен цикъл представлява една незавършена и актуална задача за изследване.

Например голяма чест от дефектите в силовите трансформатори е възможно да бъде открити чрез провеждане на хроматографски анализ на разтворените газове в трансформаторното масло. Периодичният контрол на трансформаторното масло не винаги гарантира отсъствието на условия за развитието на дефекти през времето между две последователни пробни изпитания.

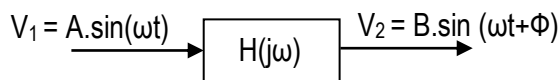
За диагностика на механични деформации в намотките на силовите трансформатори днес се използват слените основни методи:

- измерване на импеданса на късо съединение Z_k (или индуктивността L_k);
- метод на нисковолтовите импулси [7];
- анализ на честотните характеристики.

Първият метод е най-разпространен, вторият се използва само в някои страни, а третият е сравнително нов и се явява един от най-чувствителните към изменение на геометричните размери на намотките на силовите трансформатори.

2. Честотни характеристики на силов трансформатор

За определяне връзката между входната и изходната величина на RLC верига се използва предавателната и функция. Предавателната функция е фундаментална характеристики на една електрическа верига и е един от основните методи за моделиране подобни системи. С нейна помощ могат да бъдат получени, както големината на затихването на сигнала, така и фазовото му изместване.



Фиг. 1 Предавателна функция на изпитвания обект

Предавателната функция на един обект за изследване (фиг.1) се дефинира с:

$$H(j\omega) = \frac{V_2(j\omega)}{V_1(j\omega)}, \quad (1)$$

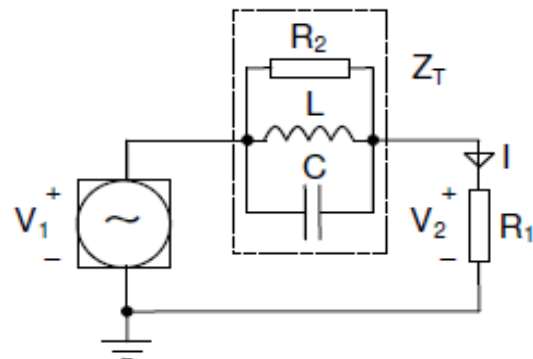
където:

- V_1 – хармоничен сигнал подаден на входа на обекта;
- V_2 – хармоничен сигнал измерен на изхода;
- $\omega = 2\pi f$.

За получаване на предавателната функция се разглежда електрическата схема представена на фиг. 2. Отношението между двете напрежения се представя с

израза:

$$V_2(j\omega) = V_1(j\omega) \cdot \frac{R_1}{R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C}} \quad (2)$$



Фиг. 2 RLC Верига и шунтиращ резистор.

От определението за предавателната функция се получава:

$$H(j\omega) = \frac{V_2(j\omega)}{V_1(j\omega)} = \frac{R_1}{R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C}} = \frac{R_1 \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \right)}{R_1 \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \right) + 1} \cdot \frac{j\omega L}{j\omega L} = \frac{R_1(j\omega \frac{L}{R_2} + 1 - \omega^2 LC)}{R_1(j\omega \frac{L}{R_2} + 1 - \omega^2 LC) + j\omega L} \quad (3)$$

Ако се приравни R_2 на нула, от уравнението ще отпадне члена $j\omega \frac{L}{R}$. При това условие се определя мястото за възникване на резонанс. При изпълнение на условието $1 - \omega^2 LC = 0 \Rightarrow \omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, се получава безкрайно затихване, което показва, че L и C са паралелно свързани. При резонансна честота предавателната функция придобива следния вид:

$$H(j\omega) = \frac{R_1(j\omega \frac{L}{R_2 \sqrt{LC}} + 1 - 1)}{R_1(j\omega \frac{L}{R_2 \sqrt{LC}} + 1 - 1) + j\omega \frac{L}{\sqrt{LC}}} = \frac{\frac{R_1}{R_2}}{\frac{R_1}{R_2} + 1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

Когато предавателна функция се сведе до най-простата си форма, тя представлява отношение на два полинома. Основните и характеристики, резонанса и граничните честоти, се явяват като корени на тези полиноми. Корените на числителя обикновено се наричат „нули“, а корените на знаменателя – „полюси“. Нулите предизвикват нарастване на усилването, докато полюсите предизвикват затихване на сигнала. Тъй като R , L и C параметрите на трансформатора са точно зададени при неговото производство, корените на полиномите ще се появяват на едно и също място на

графиката на ЧХ в случай, че няма външно въздействие върху някой от тях, винаги ще има повторяемост на резултатите от измерването независимо от мястото и времето на извършване на оценката на техническото състояние.

3. Приложение на честотните характеристики за оценка техническото състояние на силови трансформатори

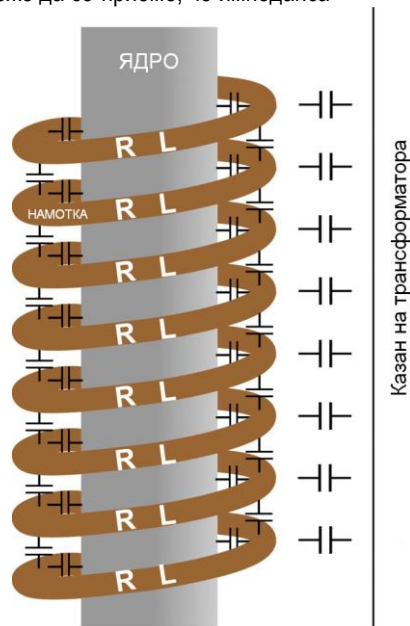
На Фиг. 4 е представена схемата за заснемане на АЧХ и ФЧХ на силов трансформатор. През трансформатора се пропуска сигнал с ниско напрежение и променяща се честота, като се следи, какво е затихването на този сигнал на изхода. Затихването на сигнала е пропорционално на импеданса на съответната намотка зависещ от капацитетите и индуктивностите и, който пък са тясно свързани с геометричните размери на системата намотка, магнитопровод, казан на трансформатора (Фиг. 3). Промяната в амплитудно честотната и фазочестотната характеристики (по нататък АЧХ и ФЧХ) е информация и доказателство за настъпили промени в геометричните и електромагнитни параметри на трансформатора. Причините за тези промени трябва да бъдат изследвани допълнително. Съществуват два момента от време, в които е желателно да се извърши снемането на ЧХ. В завода производител, по време на заводските изпитания, при което се получава така наречената еталонна характеристика на трансформатора, и на обекта, където ще бъде монтиран трансформатора. Заводските данни се използват като основна характеристика и след това всички следващи измервания се сравняват с нея.

Записването на ЧХ се осъществява, от източник на напрежение със синусоидална форма, с възможност за промяна на честотата се подава напрежение на един от изводите на трансформатора. Стойността на това напрежение се записва, от друг извод на същата намотка като изходящ сигнал. Напрежението на входящия сигнал служи за еталонно и с него се сравнява напрежението на изходящия сигнал. Разликата се записва във векторна форма със амплитуда и фазово изместване.

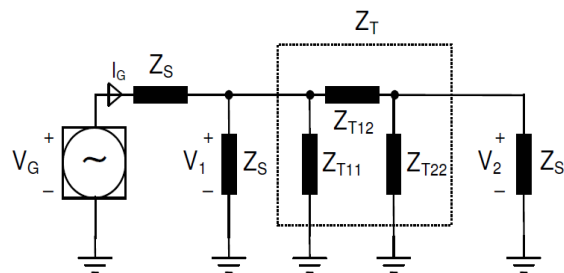
На Фиг. 4 е показана схемата за измерване на АЧХ и ФЧХ. С V_G е означен подавания от източника сигнал, V_1 е измереното еталонно напрежение, V_2 е измереното изходящо напрежение, Z_S е импеданса на измервателния инструмент, а Z_T е импеданса на трансформатора. Той може да бъде представен като последователно и/или паралелно свързани RLC вериги.

Разликата между стойностите на V_2 (изхода) и V_1 (входа) е предизвикана от стойността на Z_T . Импедансът Z_T съдържа индуктивност, капацитет и активно съпротивление и следователно е честотно зависим. Както се вижда на фигурата Z_T съдържа и два импеданса свързани към земя. Тук трансформатора е представен с П-образна заместваща схема, като стойността на импеданса между двете заземителни вериги в рамките на Z_T в идеалния случай е равен на нула. Импедансът Z_{T12} представлява импеданса на намотката, въпреки че включва и други

електрически свързани части по пътя между входа и изхода, може да се приеме, че импеданса



Фиг. 3 Физически модел на трансформатора



Фиг. 4 Основна измервателна схема за снемане на АЧХ

на намотката е доминиращ. Импедансите Z_{T11} и Z_{T12} представляват импедансите на изолацията на намотката и изолаторите към земя. Ако Z_{T11} и Z_{T12} по някаква причина се променят, това ще рефлектира върху резултата от измерването. Поради тази причина е необходимо трансформатора, измервателния инструмент, екрана на кабелите и основата на изолаторите да бъдат възможно най-добре заземени.

Разликата между V_1 и V_2 , се явява като промяна в амплитудата и фазово изместване. Големината на затихването на изходния сигнал спрямо входния се дава в децибели:

$$A_{db} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{V_2}{V_1} \right). \quad (5)$$

Фазовото изместване може да се запише като:

$$\varphi = \angle \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \quad (6)$$

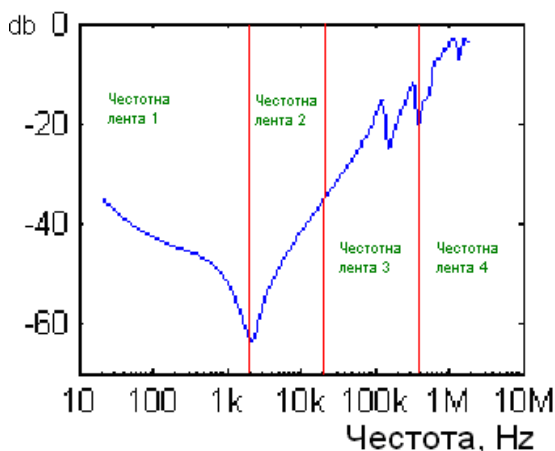
Обикновено се измерват по 200 точки за декада (логаритмично) в честотен диапазон от 20 Hz до 2 MHz. След това се изчертават две криви във функция от

честотата, една за големината на затихването и една за фазовото изместване. Повечето трансформатори изпадат в резонанс в този честотен диапазон.

4. Прилагане на метода „анализ на ЧХ” върху реален трансформатор

На фиг.5 е представена ЧХ на реален силов трансформатор получена в резултат на проведено измерване. Графиката може да бъде разделена на няколко честотни ленти, като всяка от тях дава информация за различни елементи на трансформатора. Честотните ленти са представени в таблица 1. Като пример за оценка на чувствителността на метода ще се използва ЧХ на фиг. 6. На нея са изчертани две криви. Крива номер “1” е записана при наличие на дефект трансформатора, преди неговото отстраняване, а крива номер “2” след отстраняване на проблема в трансформатора. Този потенциален проблем е оставил своя отпечатък в честотната област от 1 kHz до 10 kHz, а също така и в областта от 10 kHz до 200 kHz. Възникналият дефект се изразява в това, че магнитопровода не е заземен от производителя на електрическата машина.

Откриването на дефекти с ЧХ, когато са с близки по стойности криви е много трудна задача. За това в практиката се използва метода корелационно регресионен анализ [8].



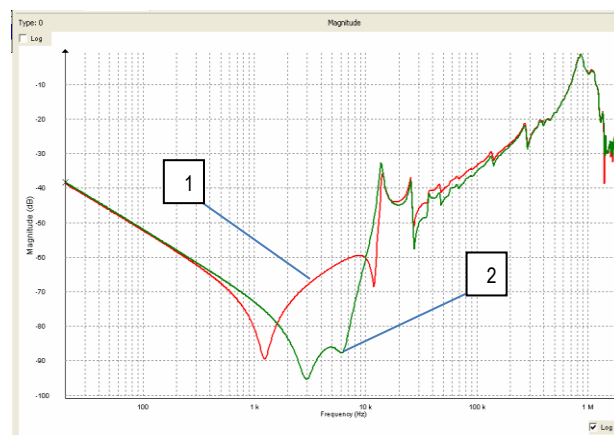
Фиг. 5 Честотни ленти в АЧХ на трансформатор

Разглеждат се две групи ЧХ: една която е еталонна заснета след окончателното завършване на всички операции по производството и изпитването на един нов трансформатор, и втора група ЧХ, заснети в момента на провеждането на дефектографията за откриването на възникнали дефекти в трансформатора. Ако получените при измерването на ЧХ, се припокриват перфектно или са много близки по стойност, ще имат коефициент на корелация близък до 1,0. Ако двете ЧХ са абсолютно независими, то стойността на корелационния коефициент ρ_{xy} ще бъде равен на 0,0. При определени случаи е възможно да се получи резултат, при който $\rho_{xy} = -1,0$. Отрицателните стойности на коефициента на корелация са недопустими.

Коефициентът на корелация, се изчислява по формулата [8]:

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (7)$$

където X_i и Y_i са стойностите на поредицата от данни, които ще сравняваме, а $\bar{X}$ и $\bar{Y}$ са средните им стойности. В таблици 2, 3 и 4 са дадени стойностите на коефициента на корелация и границите, в които той може да се намира в зависимост от това какви ЧХ сравняваме.



Фиг. 6. Изследване на реален трансформатор

Таблица 1
Честотни ленти и елементи от трансформатора, които те представляват

Честотна лента	Честота	Елемент от трансформатора	Чувствителност към повреда
1	< 2 kHz	Ядро на магнитопровода, индуктивност на намотката	Деформация на ядрото на магнитопровода, отворена верига, късосъединени навивки и остатъчно намагнитване
2	От 2 kHz до 20 kHz	Притегателна система, паралелни импеданси	Изместване на притегателната система и/или намотките
3	От 20 kHz до 400 kHz	Основни намотки	Деформация на основни или регулационни намотки
4	От 400 kHz до ~ 1 MHz	Основни намотки, регулационни намотки, вътрешни проводници	Изместване на основна или регулационна намотка, промяна на заземителните импеданси

Таблица 2
Примерни варианти за ρ_{xy}

Резултат от сравнението	ρ_{xy}
Добро съвпадение	0,95-1,0
Близко съвпадение	0,90-0,94
Лошо съвпадение	<0,89
Никакво или лошо съвпадение	≤ 0

Таблица 3
Сравняване на фаза А и С или една и съща фаза от еднотипни трансформатори

Резултат от сравнението	ρ_{xy}
Добро съвпадение	0,95-1,0
Близко съвпадение	0,90-0,94
Да се разследва	<0,90

Таблица 4
Сравняване на заводска ЧХ и ЧХ записана след време за един и същ трансформатор

Резултат от сравнението	ρ_{xy}
Добро съвпадение	0,98-1,0
Близко съвпадение	0,96-0,97
Да се разследва	<0,96

Заклучение

Метода, основан на сравняване на ЧХ може да бъде незаменим инструмент за оценка на техническото състояние на силови трансформатори и ранно откриване на потенциално опасни проблеми и дефекти. С негова помощ могат да се откриват изменения в механичната цялост на трансформатора, а също така възникнали изменения в електромагнитните му параметри в следствие на външни въздействия. При добро изпълнение на измервателната схема, винаги ще се получава повтораемост на резултатите от измерването, независимо от периода от време, който е изминал между измерванията, ако трансформатора не е претърпял инцидент. Предстои стандартизиране на метода в организациите IEC и IEEE. Няколко големи производителя на измервателна апаратура имат търговско достъпни автоматизирани измервателни системи за ЧХ. Препоръчва се задължително записване на ЧХ по време на заводските изпитания на трансформатора с цел да се осигури една еталонна ЧХ, която да послужи за основа на бъдещи ревизии на състоянието на му.

Препоръчана за публикуване от катедра
„Електрификация на минното производство”, МЕМФ

Литература

- [1] A. Kraetge, M. Krüger, J. L. Velásquez, OMICRON electronics GmbH Austria, H. Viljoen, A. Dierks, Alectrix (Pty) Ltd, South Africa, 2009, Aspects of the Practical Application of Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) on Power Transformers, CIGRE 2009, 6th Southern Africa Regional Conference
- [2] Claes Bergman, 2006. THESIS, SFRA – An application that creates customer value? <http://www.paxdiagnostics.com/6.html>.
- [3] Charles Sweetser, B.Sc., M.Sc, Dr. Tony McGrail, B. Sc., M.Sc., 2004. Sweep Frequency Response Analysis Transformer Applications, A Technical Paper from Doble Engineering, version 1.0.
- [4] G. M. Kennedy, A J McGrail and J A Lapworth, Doble Engineering, 2007. Transformer sweep frequency response analysis (SFRA), *Energize* 28-33 p.
- [5] Pax Diagnostics, 2007. Testing of power transformers using Frequency Response Analysis (FRA), <http://www.paxdiagnostics.com/6.html>.
- [6] United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, June, 2003. *Transformer Diagnostics, Facilities Instructions, Standards and Techniques, volume 3-31, 20-23 p*
- [7] W. Lech and L. Tyminski, 1966, Electric. Review, no. 18, ERA, UK. Detecting transformer winding damage - the low voltage impulse method
- [8] Георгиев И.А., Приложение на математическата статистика в машиностроенето. Д И „Техника”, София, 1982
- [9] Наредба №3 за устройството на електрическите уредби и електропроводните линии (Обн. в ДВ бр. 90 и 91 от 2004 г.)
- [10] Dr. W. H. Tang, Prof. Dr. Q. H. Wu, Springer-Verlag London Limited 2011, Condition Monitoring and Assessment of Power Transformers Using Computational Intelligence 163-194 p.