

Diss. ETH Nr. 18440

Remanenzflussbestimmung für das kontrollierte Einschalten von Leistungstransformatoren

Abhandlung zur Erlangung des Titels
Doktor der Wissenschaften

der
ETH Zürich

vorgelegt von

ANDREAS EBNER
Dipl. El.-Ing. ETH
geboren am 16. August 1978
von Ammannsegg (SO), Schweiz

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. Klaus Fröhlich, Referent
Prof. Dr. Lou van der Sluis, Korreferent

2009

Kurzfassung

In den vergangenen Jahren hat sich das kontrollierte Schalten als effektive Methode zur Reduktion von Schalttransienten vermehrt durchgesetzt, was anhand mehrerer Publikationen – insbesondere von CIGRE – belegt werden kann. Am häufigsten werden Kondensatorbänke kontrolliert geschaltet. Obschon beim unkontrollierten Einschalten von Leistungstransformatoren sehr hohe Einschaltstromtransienten auftreten können, deren Maximalwerte den Nennstrom um ein Mehrfaches übersteigen und enorme Stromkräfte in den Transformatorwicklungen verursachen, ist das kontrollierte Schalten bei Transformatoren nur auf einen kleinen Prozentsatz beschränkt. Dies liegt vor allem daran, dass für die Ermittlung der Remanenzflüsse – basierend auf welchen die optimalen Zeitpunkte für die nachfolgende Einschalthandlung berechnet werden – meist zusätzliche Spannungswandler in der Nähe des Transformators installiert werden müssen. Diese erhöhen einerseits die Kosten für das kontrollierte Schalten und andererseits ist so eine Ausrüstung bestehender Unterwerke mit kontrolliertem Transformatorschalten fast unmöglich. Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Arbeit neue Methoden zur Bestimmung der Remanenzflüsse entwickelt, die mit dem bestehenden Sensorsystem auskommen und somit keine zusätzliche Primärtechnik benötigt wird.

In dieser Arbeit wird zunächst die benötigte Genauigkeit der Remanenzflussbestimmung ermittelt. Dabei zeigt sich, dass auch für dreischenkige Transformatoren – die häufigste Konfiguration von Leistungstransformatoren der Übertragungsebene – nur das Verhalten der ersteinschaltenden Phase analysiert werden muss, falls die sogenannte „Delayed Closing“-Strategie ([5]) verwendet wird. Eine Umsetzung der sogenannten „Rapid Closing“-Strategie ([5]) in der Praxis ist kaum sinnvoll möglich, da die dynamischen Flussverläufe – diese werden für die Berechnung des optimalen Schliesszeitpunkts der beiden zweiteinschaltenden Phasen benötigt – in den meisten Fällen unbekannt sind. Sowohl mit dem theoretischen Modell eines einphasigen Transformators als auch mittels Simulationen an einem dreischenkigen Transformator lässt sich die geforderte Genauigkeit in der Remanenzflussbestimmung berechnen. Es wird gezeigt, dass beim Einschalten die Inrush-Ströme in der Praxis sogar mit einer idealen Messung der Remanenzflüsse nicht immer eliminiert werden können. Wird ein gewisser Einschaltstrom (hier 1.0 pu) toleriert, so ergeben sich realistische Anforderungen an die Remanenzflussbestimmung, die von der Reserve der Transformatorkernausschaltung sowie von der maximalen Schliesszeitpunktabweichung des Leistungsschalters abhängen. Im ungünstigsten Fall ergibt sich so eine geforderte Genauigkeit von 9 %.

Die Remanenzflüsse bilden sich während des Ausschaltvorgangs aus, der für die Leistungstransformatoren der Übertragungsebene normalerweise aus dem stationären Leerlaufbetrieb erfolgt. Dabei fließen nur die Magnetisierungsströme, die maximal einige Ampere betragen. Auch mit modernen Leistungsschaltern werden diese unmittelbar nach der mechanischen Kontakttrennung abgerissen, weshalb es nachfolgend zu einem transienten Ausschwingvorgang auf der Lastseite des Leistungsschalters kommt („Current Chopping“). Auf Grund dieses Ausschwingvorgangs verändern sich die magnetischen Flüsse auch nach dem Unterbrechen der Ströme durch die Leistungsschalter und beeinflussen so die Remanenzflusswerte signifikant. Die drei Haupteinflussgrößen dieses Vorgangs sind der Ausschaltzeitpunkt, die Magnetisierungsinduktivität sowie die Kapazität der Elemente zwischen Leistungsschalter und Transformator (Unterwerkskapazität). Wie die Sensitivitätsanalyse an einem repräsentativen Unterwerk zeigt, kann ein generell gültiges Verhalten der Remanenzflüsse in Abhängigkeit des Ausschaltzeitpunkts nicht angegeben werden, weshalb jedes Unterwerk separat analysiert werden muss. Das dazu

notwendige Simulationsmodell kann weitestgehend von den Einschaltanalysen übernommen werden und muss lediglich um die kapazitiven Komponenten ergänzt werden. Zudem muss bei den Ergebnissen ein Skalierungsfaktor berücksichtigt werden, der wegen der nicht ganz korrekten Modellierung des Magnetisierungsverhaltens benötigt wird. Eine Verifikation der Ergebnisse im Labor mit einem 400 kVA Transformator zeigt die gute Übereinstimmung von Simulation und Messung sowohl für das Einschalt- als auch für das Ausschaltverhalten.

Basierend auf diesen Erkenntnissen können jetzt neue Methoden zur Bestimmung der Remanenzflüsse entwickelt werden. Dabei zeigt sich, dass bei Verwendung der „Delayed Closing“-Strategie nur der Remanenzfluss der ersteinschaltenden Phase bekannt sein muss, was die Remanenzflussbestimmung erheblich erleichtert. Sind Spannungswandler in der Nähe des Leistungstransformators vorhanden oder können die Wicklungsspannungen zum Beispiel über den Messabgriff von kapazitiv gesteuerten Durchführungen („Measuring Tap“ (IEC) respektive „Voltage Tap“ (IEEE)) gemessen werden, so ist eine Messung gegenüber den anderen Methoden klar vorzuziehen. Diese Wandlerkonfigurationen werden jedoch nur in Spezialfällen anzutreffen sein, weshalb die Remanenzflüsse meist indirekt bestimmt werden müssen. Weil das Ausschaltverhalten deterministisch ist, kann das Remanenzflussmuster bei Kenntnis des Ausschaltzeitpunkts ebenfalls ermittelt werden. Dazu muss der Remanenzflussverlauf in Abhängigkeit des Ausschaltzeitpunkts im Controller hinterlegt werden. Dieser Verlauf wird bevorzugt aus den Simulationen der systematischen Ausschaltanalysen ermittelt oder mittels Sinus-Kurven approximiert, da eine experimentelle Identifikation äusserst aufwendig ist. Alternativ bietet sich auch kontrolliertes Ausschalten an, womit immer das gleiche Remanenzflussmuster festgelegt wird. Vorteile dieser Methode sind der geringe Aufwand bei der Ermittlung des Remanenzflussmusters, da nur ein einziger Ausschaltzeitpunkt auftritt, und die überaus unkritischen Anforderungen an die maximale Ausschaltzeitpunktabweichung des Leistungsschalters, falls ein geeigneter Zeitpunkt gewählt wird. Weiter bietet sich für das kontrollierte Ausschalten auch eine adaptive Bestimmung des Remanenzflusses der ersteinschaltenden Phase an, falls der Transformator regelmässig ein- und ausgeschaltet wird. Bei dieser Methode entfällt der Aufwand bei der Inbetriebnahme vollständig und es wird lediglich ein für den verwendeten Ausschaltzeitpunkt typischer Remanenzflusswert vorgegeben. Der exakte Wert wird dann anhand der Auswertung der nachfolgenden Einschalthandlungen nach und nach ermittelt. Somit ist dies die geeignetste Methode zur Remanenzflussbestimmung in der Praxis, da sie in sämtlichen Unterwerken angewendet werden kann und überaus gute Ergebnisse bei sehr geringem Inbetriebnahmeaufwand liefert.

Mit den Erkenntnissen aus dieser Arbeit ist mit der Bestimmung des Remanenzflusses in der Praxis das letzte Problem beim kontrollierten Schalten von Transformatoren gelöst worden. Die Remanenzflüsse lassen sich wie gezeigt mit dem stets verfügbaren Sensorsystem ausreichend genau ermitteln. Somit konnte der bisher gravierendste Nachteil beim kontrollierten Schalten von Transformatoren unter Berücksichtigung des Remanenzflusses eliminiert werden, weshalb für das kontrollierte Transformatorschalten in der Praxis eine weitere Brücke geschlagen wurde.

Abstract

In the last years controlled switching became an effective method to reduce switching transients which is documented by several publications – especially of CIGRE. Controlled switching is most commonly used for switching capacitor banks. Even though uncontrolled energisation of power transformers can lead to very high inrush current transients whose maximum values can exceed many times the rated current and cause enormous current forces in the transformer windings, controlled switching of transformers is rarely used in the field. This is mainly due to the fact, that additional voltage transformers have to be installed close to the power transformer in most cases, so that the residual fluxes – the optimal closing times are calculated based on these values – can be evaluated. On the one hand these sensors increase the costs of controlled switching and on the other hand the uprating of existing substations with controlled transformer switching is almost impossible. Thus, new methods to determine the residual fluxes based on the existing sensor system are presented in this work.

First the required accuracy of the device to determine the residual flux has to be evaluated. It is shown that for three-legged transformers – the most common configuration of power transformers on the transmission level – only the behaviour of the first phase to be energised has to be analysed if the “Delayed Closing” strategy is used. An implementation of the “Rapid Closing” strategy in the field is hardly possible because the behaviour of the dynamic fluxes – they must be used to calculate the optimal closing time of the second and third phase to be energised – is unknown in most cases. Using the theoretical model of a single-phase transformer or simulations of a three-legged transformer, the required accuracy for the determination of the residual flux can be calculated. The results show that even with an ideal residual flux measurement the energisation of a transformer without inrush-currents in the field is not always possible. If a certain inrush current can be tolerated (here 1.0 pu), much more realistic requirements for the determination of the residual flux can be obtained that depend on the reserve of the transformer core utilisation as well as on the maximum closing time deviation of the circuit breaker. In worst-case an accuracy of 9 % is necessary.

The residual fluxes are built up during the de-energisation process which normally occurs during steady-state no-load operation for the power transformers on the transmission level. At this time only the magnetising currents flow that amount to some amperes in maximum. Modern circuit breakers will chop these currents immediately after mechanical contact separation as well, whereby a transient ringdown phenomenon occurs on the load-side of the circuit breaker (current chopping). Due to these transients the magnetic fluxes still change after current interruption in the circuit breaker and thus the residual fluxes are influenced significantly. The three parameters that mainly affect this process are the instant of current chopping, the magnetising inductance of the transformer core and the capacitances of the elements located between the circuit breaker and the transformer (substation capacitance). As could be shown with a sensitivity analysis of a representative substation configuration, a generally valid behaviour of the residual fluxes depending on the instant of current chopping cannot be declared. Hence each substation has to be investigated separately. The simulation model used for these analyses can be adopted from the energisation studies and has to be completed with the capacitive elements solely. Additionally a scaling factor has to be taken into account for the simulation results because the modelling of the magnetisation behaviour is not optimal. A verification of the results with a 400 kVA transformer in the laboratory shows a good correlation between

measurement and simulation for the energisation as well as for the de-energisation studies.

Based on this knowledge, new methods to determine the residual fluxes can be developed. If the "Delayed Closing" strategy is used only the residual flux of the first phase to be energised has to be known which considerably simplifies the determination of the residual flux. The investigations show that if voltage transformers are already installed close to the power transformer or the voltages of the power transformer coils can be measured for example with the voltage tap of capacitive graded bushings, this measurement should be clearly favoured. These sensor system configurations occur quite seldom which is why the residual fluxes mostly have to be determined indirectly. Because the de-energisation process is deterministic the residual flux pattern can be calculated as well if the instant of current chopping is known. For this purpose the characteristics of the residual fluxes depending on the current chopping moment have to be stored in a look-up table in the controller. These characteristics are preferably calculated using the simulation model of the systematic de-energisation analysis or by approximating the real characteristics with sine-curves because an experimental identification is too extensive. Alternatively controlled de-energisation can be used whereby always the same residual flux pattern is generated. The advantages of these methods are the small effort to evaluate the residual flux pattern because only one instant of de-energisation will occur as well as the uncritical requirements for the maximum de-energisation time deviation of the circuit breaker if an appropriate instant is chosen. Furthermore an adaptive determination of the residual flux of the first phase to be energised is possible for controlled de-energisation, if the transformer is regularly energised and de-energised. With this method the effort during installation is zero and only a residual flux value that is typical for the used de-energisation instant has to be chosen. The exact value will be calculated little by little based on the following energisation operations. Thus, this is the best method to determine the residual flux in the field because it can be used in any substation and leads to very good results with a small effort during installation.

This work is able to solve the last problem of controlled transformer switching which was the determination of the residual fluxes. As showed the residual fluxes can be evaluated accurately enough with the existing sensor system. Thus the most serious disadvantage of controlled switching of transformers taking into account the residual flux is eliminated which will have a positive effect on the usage of controlled transformer switching in the field.