

Diss. ETH No. 12791

ELIMINATION OF TRANSIENT INRUSH CURRENTS WHEN  
ENERGIZING UNLOADED POWER TRANSFORMERS

A Dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ZURICH

for the degree of  
Doctor of Technical Sciences

presented by  
John H. Brunke  
BS, MS, Portland State University  
born February 16, 1950  
a citizen of the United States of America

Accepted upon the recommendation of  
Prof. Dr. K. Fröhlich, examiner  
Prof. Dr. H. Glavitsch, co-examiner

Zurich, 1998

# ELIMINATION OF TRANSIENT INRUSH CURRENTS WHEN SWITCHING POWER TRANSFORMERS

## **Abstract**

Transformer inrush transients, the voltage and current transients created by transformer core flux asymmetry during energization, can have highly undesirable effects. The high magnitude currents, with high harmonic content, and a direct current component, can cause damage to the transformer itself or other power system equipment, false operation of protective relays and fuses, and a general reduction of the power quality on the system. Generally these transients are either tolerated or their effects mitigated. The transients themselves can be reduced using closing resistors, reducing residual core flux magnitudes, or by the best solution, controlling the instant of energization.

The present state of the art in the controlled energization of transformers ignores residual core flux and its effect on the transient flux distribution within the transformer core. Ignored also is the inter-phase unbalance caused by magnetic circuit path lengths in a multi-legged core transformer and the effects of the fourth and fifth legs. Although the state of the art does provide a reduction in the inrush transient from the worst case of about 50-60%, it does not achieve the full potential of controlled closing in this application as it does not energize the core at the instant when the residual core flux is equal to the flux induced by the voltage applied to the winding.

In order to determine the optimal closing instant, the residual core fluxes can be determined by integration of the winding voltage. The ability to do this was confirmed by numerical studies, field and laboratory tests.

In order to develop controlled closing strategies a numerical model was developed based on, and verified in its performance by, field tests on a 230 kV transformer. Tests on a smaller laboratory transformer were made to verify study results. This tool allowed the investigation of transient flux phenomena.

Optimal closing strategies exist and can be determined for all core and winding configurations except 4/5 legged core transformers which have no delta connected winding. For these transformers a near optimal solution exists. These strategies include:

**Single phase strategy.** For single phase transformers, residual flux on each phase must be considered to determine the correct closing times.

For multi-phase transformers with three legged cores or delta connected windings, three strategies exist:

**Rapid closing strategy.** Closes the first phase(s), then the other phase(s) at the first optimal point which will occur within  $\frac{1}{2}$  cycle after the first phase(s) is energized. During this period the division of core flux is non-linear and a detailed knowledge of the transient core flux characteristics of the transformer is required. Residual flux in all three phases is also required.

**Delayed closing strategy.** This strategy energizes the first phase(s) and then delays closing the other phase(s) until core flux equalization, a phenomena which is caused by the impedance changes in the transformer as the core or core legs are in different degrees of saturation, results in a significant reduction of residual flux. This greatly simplifies the control strategy and requires the measurement of residual flux on one phase only. No detailed knowledge of the transformer's characteristics is required.

**Three phase strategy.** This strategy allows the use of a non-independent pole control circuit breaker, but requires high residual flux magnitudes and a pattern of residual fluxes with one phase residual of zero. Careful consideration must be given to residual polarities as well.

Statistical numerical studies were conducted with a simulated circuit breaker whose characteristics included prestrike and mechanical timing scatter. The results showed that with the expected performance from a modern circuit breaker resulted in significant reductions in the inrush transient current magnitudes were achieved. Inrush currents were typically reduced to 5 to 20 % of the worst case.

By measuring the residual core flux and choosing the proper closing strategy, each phase can be energized when the flux in the core is equal to the instantaneous value of flux induced by the voltage applied to each winding. This results in the inrush transients created when switching unloaded power transformers being reduced to levels less than the transformers load current levels. The consequences of these reductions of inrush current include improvements in power quality and potentially prolonging the life span of the transformer. Therefore controlled switching has the effect of controlling costs.

# **Elimination von transienten Einschaltströmen bei der Einschaltung leerlaufender Leistungstransformatoren**

## **Zusammenfassung**

Beim Einschalten leerlaufender Leistungstrafos entstehen durch eine Asymmetrie des magnetischen Flusses transiente Überspannungen und/oder Überströme, welche in hohem Masse unerwünschte Effekte zeigen. So können die hohen Überströme, welche meist noch einen hohen Anteil an harmonischen Oberwellen sowie ein grosses Gleichstromglied aufweisen, den Transformator, aber auch andere benachbarte Systemkomponenten mechanisch schädigen. Fehlauslösungen der Schutzeinrichtungen und Sicherungen sind ebenfalls mögliche Folgen. Generell ist ein Verlust an „Power Quality“ zu verzeichnen. Üblicherweise werden diese Transienten heute entweder hingenommen oder es wird versucht, deren negative Auswirkung zu lindern. Methoden zur Reduktion der Transienten selbst sind Einschaltwiderstände oder eine Verminderung des Remanenzflusses im Trafo.

Ein neuerer besserer Ansatz ist jedoch die phasensynchrone Einschaltung bezogen auf die netzfrequente Betriebsspannung. Der diesbezügliche Stand der Technik ist, dass wohl synchron zur Phasenlage der Netzspannung geschaltet wird, dass aber dabei keine Rücksicht auf den im Trafokern vorhandenen Remanenzfluss genommen wird. Auch werden weder die Längenunterschiede im magnetischen Kreis zwischen den Phasen bei Mehrschenkeltransformatoren noch die Effekte, die ein vierter oder fünfter Schenkel bewirken, berücksichtigt. In Bezug auf den höchst möglichen Einschaltstrom, also im Falle keiner Gegenmassnahme, ist daher mit der heutigen Technik nur eine Reduktion auf 50%-60% möglich. Das Potential des kontrollierten Schaltens ist somit bei weitem nicht ausgenützt. Dies ist nur möglich, wenn der Remanenzfluss vor der Einschaltung berücksichtigt wird.

Die Bestimmung des Restflusses kann, wie in der Arbeit durch Computermodellierung und auch experimentell in Labor- und Feldversuchen gezeigt wird, durch Integration der Wicklungsspannung erfolgen. Daraus werden in der Folge optimale Schliesswinkel für die drei Phasen abgeleitet, so dass der hohe transiente Einschaltstrom praktisch vermeidbar ist.

Um dafür entsprechende Strategien aufzubauen, wurde ein numerisches Modell entwickelt, mit dem die Flussverhältnisse im Trafo simulierbar sind.

Dieses Modell wurde durch Laborversuche und auch durch einen Feldversuch in einem 230 kV Netz verifiziert.

Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt, dass praktisch für alle Kern- und Wicklungsanordnungen ein optimaler Einschaltwinkel für die drei Phasen existiert. Einzige Ausnahme sind Vier- und Fünfschenkeltransformatoren, welche nicht in Dreieck geschaltet sind. Es ist dabei zu unterscheiden, ob die einzelnen Phasen magnetisch und/oder auch elektrisch (etwa durch eine Tertiärwicklung oder durch Dreieckschaltung) gekoppelt sind, so dass der Fluss in der zweit- und drittschliessenden Phase durch die Verhältnisse in der zuerst geschlossenen Phase beeinflusst wird. Je nach Situation kommen dabei folgende unterschiedliche Strategien zur Anwendung:

Für Einphasentrafos muss voneinander unabhängig nur in jeder Phase der Remanenzfluss bestimmt werden und daraus dementsprechend für jede Phase der optimale Einschaltwinkel berechnet werden, dass nach dem Schliesszeitpunkt keine unstetige Flussänderung und somit kein Ausgleichsvorgang nötig ist. Für Mehrschenkeltrafos oder für Einphasentrafos in Dreiecksschaltung sind drei Strategien möglich, welche je nach Situation einsetzbar sind:

Schnellschliessung: Die erste Phase wird zum optimalen Zeitpunkt, der vom Remanenzfluss abhängt, geschlossen. Innerhalb einer halben Periode der Netzfrequenz werden die beiden anderen Phasen simultan geschlossen, und zwar abhängig von dem durch die erste Phase eingekoppelten Fluss. Dieses Verfahren ist genau, erfordert aber eine rasche, innert einiger weniger Millisekunden durchzuführende Berechnung des in diesen beiden Phasen auftretenden dynamischen Flusses. Die erforderliche Computerleistung ist daher hoch. Zudem muss in allen drei Phasen der Remanenzfluss vorher bestimmt werden. Zudem ist eine genaue Kenntnis der magnetischen Eigenschaften des Kerns erforderlich.

Verzögerte Schliessung: Diese Strategie schliesst wie vorher die erste Phase optimal, entsprechend dem Remanenzfluss in dieser Phase. Die beiden anderen Phasen werden wieder simultan geschlossen aber um etliche Halbwellen der Netzfrequenz später. In diesem Zeitintervall hat, wie die Untersuchungen zeigen, ein Ausgleichsvorgang für die Flüsse in diesen beiden Phasen derart stattgefunden, dass der Remanenzfluss nahezu verschwunden ist. Die Strategie ist daher gegenüber dem ersten Fall stark vereinfacht und benötigt zudem nur die Erfassung des Remanenzflusses in der ersten Phase.

Simultane Schliessung aller drei Schalterpole: Diese Strategie erlaubt die Verwendung eines Schalters mit nur einem Antrieb. Sie funktioniert aber nur dann, wenn der Remanenzfluss in zwei Phasen relativ hoch, etwa 60% - 70%, und in einer Phase null ist. Wesentlich dabei ist die genaue Berücksichtigung der Polaritäten.

Da ein realer Schalter mechanische und dielektrische Streuungen hat, sind auch die optimalen Schliesszeitpunkte statistisch streuend und damit ist eine Abweichung vom optimal erzielbaren Ergebnis, nämlich kein transienter Einschaltstrom, hinzunehmen. Allerdings wurde durch Simulation eines realen Schalters gezeigt, dass für moderne Leistungsschalter trotz dieser Streuung eine Reduktion, ausgehend vom schlimmsten Fall, nämlich nichts tun, auf 20% bis 5% möglich ist. Damit ist es unter Bestimmung des Remanenzflusses sowie richtiger Wahl der Strategie, die transienten Einschaltströme zu vermeiden und einen leerlaufenden Leistungstransformator so einzuschalten, dass der Strom kleiner als der Nennstrom des Trafos ist. Der Trafo wird damit geschont, was sicherlich zu einer Verlängerung der Lebensdauer beiträgt und damit das kontrollierte Schalten von hoher Relevanz für die Kosteneinsparung des EVU's sein kann.