



TRANSFORMER-LIFE-MANAGEMENT CONFERENCE

Ofentransformatoren: Design, Auslegung und Herstellung

Dipl.-Ing. Gerhard Greve, ABB AG



Gerhard Greve is presently Product Technology Manager for industrial transformers within the ABB group. His office is located in the ABB AG transformer factory in Bad Honnef, Germany. In his function he is the ABB technical responsible for Industrial Transformer products with the following key responsibilities and accountabilities:

- Represent Industrial Transformers within the Product Group Technical Team.
- Development of Industrial Transformer product range.
- Development and implementation of Design Tools related to Industrial Transformers and their applications.
- Introduction and maintenance of Technical Standards for Industrial Transformers.
- Influence specification at the tender and pre-tender stage, through conceptual discussions.
- Participation in internal / external design reviews.
- Participate in Sales pursuit, conferences and presentations with customers and suppliers to further ABB's Industrial Transformer business.
- Manage and develop the R&D team. tractors and utilities are the main activities, next to ensuring that the Dubai office keeps delivering its excellent performance in order handling and customer satisfaction.





Ofentransformatoren: Design, Auslegung und Herstellung

TLM 2014 – Transformer Life Management Tagung
08. September bis 09. September 2014, Neuss

Ofentransformatoren: Design, Auslegung und Herstellung

Dipl. Ing. Gerhard Greve ABB AG, Bad Honnef, Germany

Abstract

Defined by the process of electric arc furnaces the demands on furnace transformer are unique. These transformers have to be designed and manufactured to withstand the special requirements. Very high secondary currents. Short circuit strength and mechanical stability. Large regulation range with many voltage taps. Overload capability (defined load cycles). Ability to withstand transient switching over voltages. Defined by the arc at the electrodes the working conditions change rapidly and frequently between no load and short circuit at the electrodes. The following describes some aspects during the design and manufacturing of furnace transformers.

Einleitung

Charakteristisch für Ofentransformatoren ist der große Einstellbereich der Sekundärspannung. Diese Spannungseinstellung kann nicht auf der Hochstromseite (Sekundärseite) erfolgen, wo nur feste Verbindungen mit großen Querschnitten in Frage kommen. Von der Anordnung der Spannungseinstellung hängt aber weitgehend die Wahl der Transformator-schaltung ab.

Regelung der Unterspannung:

Verbreitet sind drei Grundkonzepte der Regelung die im Folgenden näher beschrieben werden:

Direkte (Induktions) Regelung.

Bei der direkten Regelung wird die Übersetzung des Transformators durch Zu- und Wegschalten von Windungen in der Hochspannungswicklung verändert. Bei der

maximalen Sekundärspannung liegt die geringste Anzahl von Primärwindungen an der konstanten Primärspannung. Beim Herabsetzen der Sekundärspannung durch zuschalten von weiteren Primärwindungen sinkt die Windungsspannung und die magnetische Flussdichte (Induktion) im Kern woraus sich die Benennung „Induktionsregelung“ erklärt.

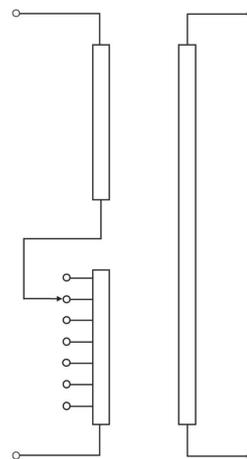


Bild 1: Schaltschema direkte Regelung

Gewöhnlich haben Ofentransformatoren auf einem Abschnitt von der maximalen Sekundärspannung abwärts im Einstellbereich bis zum sogenannten „Kniepunkt“ eine konstante Nennleistung. Unterhalb dieses Punktes kann ein konstanter Sekundärstrom entnommen werden. Diese Art der Regelung ist weit verbreitet hat aber einige Einschränkungen die im Folgenden erörtert werden.

Zunächst einmal würde eine Regelung bis herunter zu extrem niedrigen Sekundär-

Ofentransformatoren: Design, Auslegung und Herstellung

Spannungen einen unverhältnismäßig großen Einstellbereich der der primärseitigen Wicklung erforderlich machen. Wenn der Transformator die maximale Sekundärspannung abgibt, werden indem nicht benutzten Teil der Stufenwicklung hohe Spannungen induziert. Außerdem treten in diesen Wicklungsteilen Schwingungserscheinungen auf, wenn Schaltüberspannungen von der Primärseite her in den Transformator gelangen.

Allgemein lässt sich sagen das Trafos mit hohen Primarspannungen oder – strömen die Auswahl eines passenden Stufenschalters schwierig gestalten kann. Bei Spannungen größer 50kV oder primären Wicklungsströmen größer als 2000A ist eine Alternative Art der Spannungsregulierung oft technisch und oder / wirtschaftlich Vorteilhaft.

Wird bei der direkten Regulierung eine Regelwicklung mit Stufen gleicher Windungszahl verwendet ergeben sich sekundärseitig Spannungsstufen die weder absolut noch relativ glich sind. Sollte prozessbedingt gleich große Spannungsschritte erforderlich sein, ist eine andere Art der Spannungsregulierung zu wählen.

Booster (Zusatztransformator) Regelung.

Bei dieser Schaltung hat ein Haupttransformator zwischen der primären Anschluss Spannung und einer Sekundärspannung irgendwo innerhalb des Regelbereiches eine konstante Übersetzung. Eine in einer Tertiärwicklung induzierte veränderliche Spannung wird auf einen zweiten Transformator gegeben dessen Sekundärwicklung mit der des Haupttransformators in Reihe geschaltet ist. Dieser sogenannte Booster-transformator kann zu- oder gegen geschaltet werden, wobei die höchste abgegebene Spannung dem halben Regelbereich entspricht. Die Typenleistung des Zusatztransformators ist also kleiner als die eines vorgeschalteten Regeltransformators für die ganze Ofenleistung, besonders, wenn aufgrund der hohen Anschlussspannung keine Sparschaltung realisiert werden kann. Durch den Haupttransformator fließt immer die gesamte Leistung, wobei ein Teil davon direkt in die Sekundärwicklung geht und ein anderer Teil vom Zusatztransformator übertragen wird.

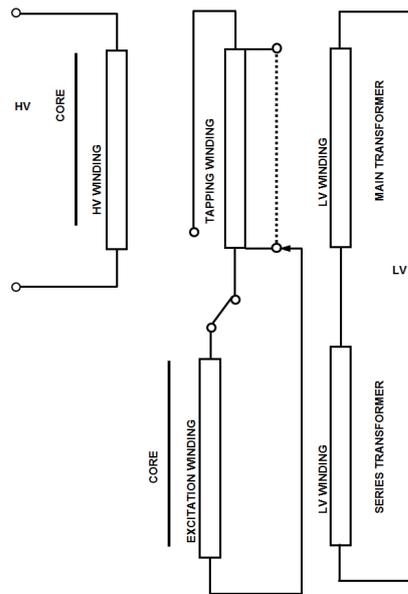


Bild 2: Schaltschema Booster Regelung

Der Vorteil des Zusatztransformators besteht darin, dass nur der geregelte Teil der Leistung, und davon auch nur die Hälfte, durch den Stufenschalter und den Zusatztransformator fließt. Eine Herausforderung liegt in der Führung des Sekundärstroms zwischen Haupt- und Zusatztransformator. Zum einen handelt es sich um sehr hohe Ströme die eine Verbindung der beiden Aktivteile mit einem entsprechenden Querschnitt nötig machen, zum zweiten haben die beiden Aktivteile ja voneinander abweichende Typenleistungen und sollten daher verschiedene Abmessungen haben. In Abhängigkeit von diesen Parametern gibt es verschiedene konstruktive Lösungen für die Verbindung und den Einbau der beiden Aktivteile.

Der natürliche Anwendungsbereich dieser Schaltung sind Transformatoren mit einer hohen primären Anschlussspannung, mit einem großen Einstellbereich und mit einer hohen Leistung, besonders wenn der Prozess identische Stufenspannung auf der Sekundärseite verlangt.

Ofentransformatoren: Design, Auslegung und Herstellung

Regelung durch separaten Regeltransformator

Das Prinzip dieser hier dargestellten Schaltung ist einfach.

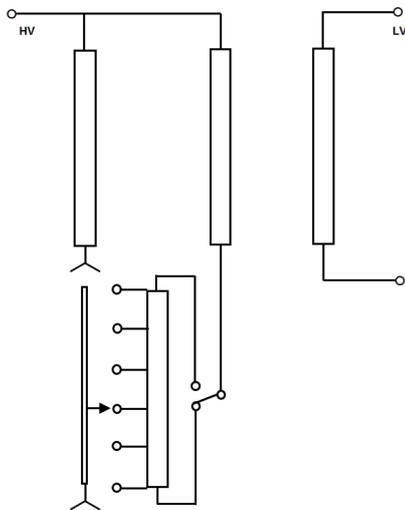


Bild 3: Schaltschema mit separatem Regeltransformator

Die Wahl der Zwischenkreisspannung ist in erster Linie vom verwendeten Stufenschalter abhängig. Der Stufenschalter ist durch seine maximal zulässige Strombelastbarkeit, die Stufenspannung zwischen den Anzapfungen und die Spannungsfestigkeit über den Einstellbereich gekennzeichnet. Unter Berücksichtigung dieser Parameter gilt es eine geeignete Zwischenkreisspannung zu wählen. Der Regeltransformator wird vorzugsweise in Sparschaltung gebaut, um eine geringe Baugröße und Reaktanz sowie möglichst niedrige Verluste zu erzielen. Bei der Übersetzung 1:1 tritt das Minimum der Verluste und der Reaktanz ein, und es kann daher vorteilhaft sein, diese Stellung in den oberen Teil des Einstellbereichs zu legen, in dem die hohe Leistung entnommen wird. Damit ergibt sich dann eine Zwischenkreisspannung gleich der primären Anschlussspannung oder niedriger. Andererseits hat der Regeltransformator die kleinste Typenleistung wenn der Einstellbereich beiderseits der Übersetzung 1:1 liegt. Schließlich kann eine höchste Zwischenkreisspannung vorteilhaft sein, die höher als die Primärspannung ist. In diesem Fall kann ein Stufenschalter mit niedrigerem

Nennstrom verwendet werden. Die Kosten des Stufenschalters sind häufig ausschlaggebend. Regeltransformatoren in Sparschaltung sind bei optimaler Auslegung gegenüber Fehlern im Zwischenkreis nicht kurzschlussfest. Man stellt deshalb die Forderung, dass die Wahrscheinlichkeit von Fehlern im Zwischenkreis als vernachlässigbar klein angesehen werden kann. Diese Voraussetzung wird als erfüllt angesehen wenn Regel- und Haupttransformator ohne dazwischenliegenden Leistungsschalter direkt miteinander verbunden sind. Besonders wenn die beiden Aktivteile in einem gemeinsamen Kessel untergebracht sind. Sind diese Voraussetzung nicht gegeben muss man entweder den Spartransformator grösser auslegen oder ihn durch einen Volltransformator ersetzen, der wiederum eine höhere Reaktanz, sowie größere Abmessungen und ein höheres Gewicht hat.

Im Zwischenkreis kann man durch eine primäre Stern- Dreieck- Umschaltung des Haupttransformators den Einstellbereich erweitern.

Kern- oder Manteltransformator?

ABB hat in der Vergangenheit beide Typen gleichberechtigt für den Bau von Ofentransformatoren verwendet. Die Entwicklung der Konstruktions- und Produktionstechnik im Transformatorenbau hat indessen die Kernbauweise begünstigt. Die meisten Ofentransformatoren werden heutzutage deshalb in der Kernbauweise hergestellt: In einigen Anwendungsbereichen jedoch bietet die Bauart Manteltransformator jedoch Vorteile, sodass beispielsweise bei folgenden Anforderungen eine Auslegung als Manteltransformator in Betracht gezogen werden sollte:

- Bei im Verhältnis zur Nennleistung extrem hohem Sekundärstrom (niedriger Sekundärspannung).
- Forderung nach extrem niedriger Reaktanz.
- Forderung bestimmter Stufenreihen.

Bei einem Manteltransformator wird die Wicklung in mehrere Gruppen von primär-Sekundärseiben aufgeteilt, die miteinander abwechseln.

Aufgrund dieser Wicklungsanordnung kann ein Manteltransformator mit einer wesentlich niedrigeren relativen Reaktanz ausgeführt

Ofentransformatoren: Design, Auslegung und Herstellung

werden als ein entsprechender Kerntransformator.

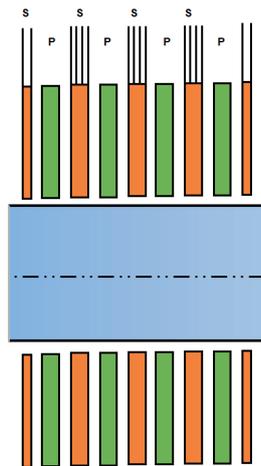


Bild 4: Wicklungsschema Manteltransformator
(P = Primär- / S = Sekundärwicklung)

Zusätzlich können in der Primärwicklung bei beliebigen Windungszahlen Anzapfungen vorgesehen werden, die in jeder Gruppe gleich sind man kann also in einem Manteltransformator mit Induktionsregelung Stufen annähernd gleicher Spannung erzeugen. Sollten allerdings die oben genannten Anforderungen a) b) oder c) nicht zutreffen ist der Materialeinsatz und der Fertigungsaufwand für einen Manteltransformator ungleich höher als bei einem vergleichbaren Transformator in Kernbauweise.

Hochstrom: Schienensystem und Durchführungen.

In einem Ofentransformator in Kernbauweise muss die Hochstromwicklung außen liegen, damit man den Strom entlang der ganzen Schenkellänge entnehmen kann.

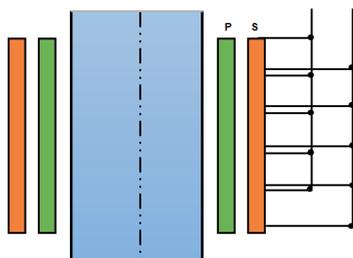


Bild 5: Wicklungsschema Kerntransformator
(P = Primär- / S = Sekundärwicklung)

Hochstromwicklungen werden gewöhnlich entweder als Schrauben- oder als Scheibenwicklung in parallelen Gruppen ausgeführt. Jede Gruppe enthält die gesamte Windungszahl der Wicklung mit mehreren parallelen Teilleitern. Die Eingänge sowie die Ausgänge der Gruppen werden anschließend mit Sammelschienen, die entlang der Wicklung verlaufen, verbunden und die Gruppen somit parallel geschaltet.

Werden die Wicklungseingänge sowie die Ausgänge separat aus dem Kessel herausgeführt spricht man von einer offenen Schaltung. Die Hochstromdurchführungen können hierbei wahlweise oben auf dem Deckel oder seitlich an der Kesselwand angeordnet werden. Der Vorteil dieser Schaltung ergibt sich aus der sogenannten kompensierten Schienenföhrung. Benachbarte Schienen haben jeweils eine entgegengesetzte Stromrichtung, gleiches gilt für nebeneinander angeordnete Durchführungen. Durch diese kompensierte Anordnung werden die magnetische Feldstärke und die Zusatzverluste in den Konstruktionsteilen sowie die Zusatzreaktanzen vermindert.

Weitaus verbreiteter sind Ofentransformatoren mit einer internen Dreieckschaltung. Die Anzahl der Durchführungen je Phase wird durch die Höhe des Sekundärstromes definiert. Verbreitet sind Transformatoren mit zwischen 2 und 6 Durchführungen je Phase. Hierbei gibt es zwei Hauptgruppen deren Bezeichnung aus der Anordnung der Hochstromdurchführungen abgeleitet ist. Bei der „coplanaren“ Anordnung sind die Durchföhrung der drei Phase jeweils auf gleicher Höhe angeordnet, bei der „triangulierten“ Anordnung formen die Durchföhrungen der drei Phasen ein gleichseitiges Dreieck.

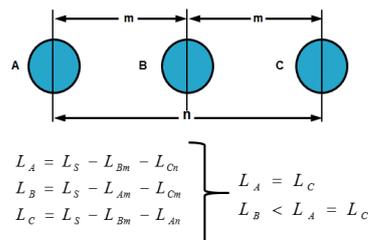


Bild 6: Schema „Coplanare“ Anordnung der Durchführungen

Ofentransformatoren: Design, Auslegung und Herstellung

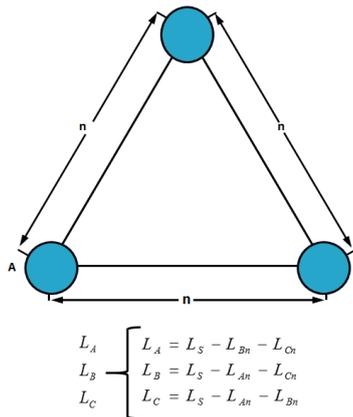


Bild 7: Schems „Triangulierte“ Anordnung

Aus Sicht des Transformatorherstellers erlaubt eine „coplanare“ Anordnung der Durchführungen eine einfachere Konstruktion, da für die „triangulierte“ Anordnung nicht kompensierte zusätzliche Stecken geführt werden müssen um den axialen Versatz der Durchführungen zu realisieren.

Hochstromdurchführungen werden üblicherweise als Luft / Öl gekühlte Schiene oder als wassergekühltes U-Rohr ausgeführt. Der Vorteil der Schienendurchführung liegt in dem einfacheren Design. Die Wasserkühlung der U-Rohre erlaubt dagegen im Vergleich wesentlich höhere Stromdichten und dadurch die Verwendung von weniger parallelen Durchführungen. Vor allem für höhere Nennströme werden daher oft U-Rohre bevorzugt. In der Praxis werden für Transformatoren mit offener Schaltung häufig Schienendurchführungen verwendet da bei dieser Schaltung der Durchführungsstrom dem Phasenstrom entspricht. Bei Transformatoren mit interner Dreieckschaltung entspricht der Strom durch die Durchführungen dem (bei der üblicherweise verwendeten Dreieckschaltung) um den Faktor $\sqrt{3}$ größerem Leiterstrom. Daher finden bei Ofentransformatoren mit dieser Schaltung häufig wassergekühlte U-Rohre Verwendung.

Betrieb und Kenngrößen

Im Unterschied zu Leistungstransformatoren ist bei den meisten Ofentransformatoren die Nennleistung nicht über den gesamten Regelbereich konstant, sondern fällt ab dem sogenannten „Kniepunkt“ linear mit der

Unterspannung. Das bedeutet für den Transformator einen Bereich mit konstanter Leistung (oberhalb des Kniepunktes) und einen Bereich mit konstantem Sekundärstrom (unterhalb des Kniepunktes).

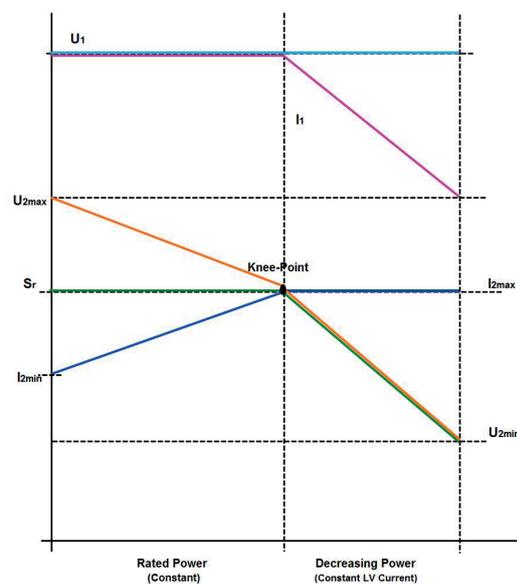


Bild 8: Typischer Verlauf über den Regelbereich

Diese Aufteilung erlaubt eine dem Betrieb angemessene Auslegung der Wicklungen und Ableitungen und somit ein optimiertes Design des Aktivteils und damit auch des gesamten Transformators

Anordnung von Seriendrosseln

Wie im vereinfachten Schaltschema „Bild 9“ dargestellt werden häufig Seriendrosseln in Reihe zu Ofentransformatoren geschaltet. Diese Drosseln werden im Allgemeinen mit einem Regelbereich bestehend aus verschiedenen Reaktanzen ausgeführt. Dies erlaubt einen Betrieb mit, für den Prozess, optimalen Impedanzen. Der Regelbereich kann mit Hilfe von Umstellern oder Lastschaltern realisiert werden. In Abhängigkeit von Beschränkungen während des Transportes und auf der Anlage können diese Seriendrosseln entweder im gleichen Kessel wie der Transformatoraktivteil oder in einem separaten Kessel untergebracht werden. Die Verwendung eines gemeinsamen Kessels erlaubt häufig eine günstigere Auslegung im Vergleich zu Lösung mit zwei Kesseln.



Ofentransformatoren: Design, Auslegung und Herstellung

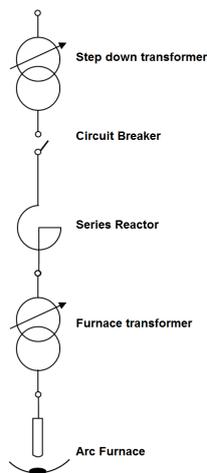


Bild 9: Vereinfachtes Schaltschema

Literatur:

- [1] Grosse Ofentransformatoren
Bengt Grundmark

Zusammenfassung

Der Ofenprozess stellt besondere Anforderungen an die dort verwendeten Transformatoren. Sowohl die geforderten hohen Ströme auf der Unterspannungsseite als auch der, für den Prozess notwendige, sehr große Regelbereich, stellen besondere Herausforderungen an die Auslegung dieser Transformatoren und erfordern besondere Lösungen.

Prozessbedingte Belastungen wie:

- Häufiges Zuschalten durch Vakuumschalter.
- Andauernder Wechsel zwischen Betrieb im Leerlauf und Betrieb mit kurzgeschlossenen Elektroden.
- Betrieb im Lastzyklus mit Belastungen grösser als die Nennlast

müssen sowohl während der Auslegung als auch der Herstellung von Ofentransformatoren berücksichtigt werden

Kontakt:

ABB AG
Lohfelder Strasse 19-21
53604 Bad Honnef
Gerhard Greve
Tel.: 02224/14126
Email: gerhard.x.greve@de.abb.com