

1 Vorbemerkung

Das vorliegende Buch wendet sich an Studierende der Fachrichtung Elektrotechnik an Fachhochschulen mit den Bereichen Elektrotechnische Anlagen und Elektroenergieversorgung sowie an Ingenieure in der Praxis, in deren Aufgabengebiet die Betriebsüberwachung von Leistungstransformatoren fällt, wobei von einer Nennleistung größer 10 kVA auszugehen ist. Zunächst werden Aussagen zum Aufbau und zur Technologie der Fertigung des Transformators getroffen. Seine Funktion wird unkonventionell durch die Magnetisierungserscheinungen beschrieben. Die Erwärmung des Transformators findet wegen ihres lebensdauerbestimmenden Einflusses besondere Aufmerksamkeit. Schwerpunkt bilden die Formen seines stationären und nicht stationären Betriebsverhaltens bei symmetrischer und unsymmetrischer Belastung. Schaltvorgänge werden mathematisch verständlich beschrieben. Entstehung und Auswirkung der harmonischen Ströme und Spannungen stellen die Verbindung zur Leistungselektronik dar. Die anwenderspezifischen Ausführungsformen und Schaltungen des Leistungstransformators wie Stell-, Zusatz-, Spar- und Stromrichtertransformatoren werden eingehend behandelt. Untersucht werden auch die Rückwirkungen auf das speisende Netz durch nicht lineares Abnehmerverhalten. Besondere Aufmerksamkeit wird dem Transformatorschutz gewidmet, aber auch dem Auftreten von Wanderwellen. Abschließend wird im Kapitel Messwerterfassung zu Schaltung und Einsatz induktiver Messwandler ein Überblick und Ausblick gegeben.

Der entwickelte und gegenwärtig zur Verfügung stehende Dreiphasentransformator stellt ein elektrotechnisches Betriebsmittel mit hervorragenden technischen Eigenschaften dar. Er besitzt einen hohen energetischen Wirkungsgrad, große Zuverlässigkeit und eine lange Lebensdauer. Da eine wirtschaftliche Übertragung von Elektroenergie zwischen Kraftwerken und Abnehmern die Errichtung mehrerer Spannungsebenen erfordert, hat der Leistungstransformator in der Elektroenergieversorgung eine Schlüsselrolle übernommen. Unterschiedliche Spannungsebenen im Versorgungssystem sind notwendig, weil für das wirtschaftliche Optimum der jeweils zu übertragenden Leistung eine zugeordnete Spannung und Stromstärke besteht. Von Bedeutung sind dabei Stand der Technik und die Kosten des Leitermaterials und der Isolierung. Die Aufgabe des Transformators besteht nun darin, die Spannungsebenen des Versorgungssystems miteinander zu verbinden. Die Grenzleistung von Transformatoren hat sich in der Weiterentwicklung des Transformatorenbaus ständig nach oben entwickelt. Berechnungsoptimierung, Verbesserung der magnetischen Eigenschaften der Transformatorbleche und Fortschritte in der Fertigungstechnologie haben dazu wesentlich beigetragen. Letztlich bestimmt aber die zulässige Baugröße die Grenzleistung des Transformators

und wird damit abhängig von den möglichen Transportbedingungen zwischen Hersteller und Einsatzort. Wenn man vom Schiffstransport absieht, sind beim Bahntransport das Bahnprofil und die zulässige Achslast für die Grenzleistung des Transformators maßgebend. Für die Einsatzgebiete von Transformatoren lassen sich eine Reihe wichtiger Zuordnungen angeben: Einzig in den Kraftwerken passen Maschinen- oder Blocktransformatoren die Spannungen der Generatoren an die Übertragungsleitungen an. Wird dabei vom Bahntransport des Transformators ausgegangen, liegen die Grenzleistungen heute bei 1 200 MVA und einer Oberspannung von 400 kV.

In den Übertragungsnetzen verbinden Netzkuppletransformatoren die Hochspannungsnetze miteinander. Hier kommen z. B. Transformatorbänke zum Einsatz, die aus Einphasentransformatoren in Sparschaltung realisiert werden und zur Kupplung des 400- mit dem 220-kV-Netz dienen. Ihre Durchgangsleistungen können 660 MVA bis 1 000 MVA betragen. Dreiphasentransformatoren werden zur Netzkupplung von 400 kV und 110 kV eingesetzt (bis 300 MVA), bei der Kupplung von 110 kV mit Mittelspannungsnetzen liegen die Leistungsbereiche zwischen 12,5 MVA und 63 MVA. Verteilungstransformatoren, die Mittelspannungsnetze mit Niederspannungsnetzen verbinden, werden im Leistungsbereich von 100 kVA bis 1 600 kVA hergestellt.

In Industrienetzen finden Transformatoren Anwendung, die in ihrem konstruktiven Aufbau den speziellen industriellen Zwecken und technologischen Forderungen angepasst sind.

Dazu gehören u. a. Transformatoren für Stromrichteranlagen (Oberspannungen bis 110 kV) und Ofentransformatoren der metallurgischen Industrie (Oberspannungen 10 kV bis 220 kV), aber auch Anlasstransformatoren für leistungsstarke Antriebe.

Allgemein kann die Aussage getroffen werden: Im Bereich der Elektroenergieversorgung werden heute in Europa Transformator-Baueinheiten vorwiegend in den Leistungsklassen 50 kVA bis 1 000 MVA hergestellt, bei einem Nennspannungsbereich zwischen 400 V und 400 kV.

1.1 Die historische Entwicklung des Transformators

[1; 2; 3; 4]

Die Geschichte der „Entwicklung der Starkstromtechnik“ wird in hohem Maße von der Entwicklung des Transformators und dessen Anwendung als Hochspannungsquelle geprägt.

Die Entwicklung des Transformators geht bereits auf die Arbeiten von *Faraday* im Jahr 1831 zurück, in dem er das Prinzip der elektromagnetischen Induktion entdeckte. Er benutzte damals ein System mit einem geschlossenen Eisenkreis,