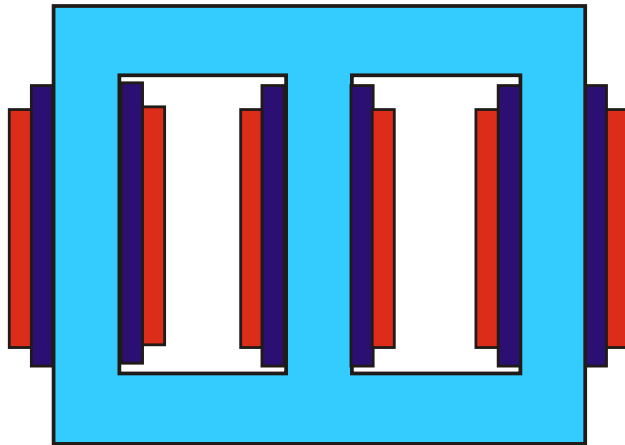




Universität Hannover
Institut für Energieversorgung und
Hochspannungstechnik



Vorlesung Elektrische Energieversorgung I

Skript Transformatoren

(Korrigierte Ausgabe 2005)

Bearbeiter: Prof. B.R.Oswald

Inhaltsverzeichnis

1	Bauarten und Einsatz im Netz	1
2	Gleichungen und Ersatzschaltbild des Einphasentransformators	6
2.1	Einphasen-Zweiwicklungstransformatoren.....	6
2.1.1	T-Ersatzschaltungen des Zweiwicklungstransformators.....	9
2.1.2	II-Ersatzschaltungen des Zweiwicklungstransformators.....	12
2.1.3	Ermittlung der II-Ersatzschaltung nach dem Knotenpunktverfahren*...	13
2.1.4	Ersatzschaltungen des Zweiwicklungstransformators ohne Übertrager*	14
3	Schaltgruppen der Drehstromtransformatoren	16
3.1	Sternschaltung der Wicklungen.....	19
3.2	Dreieckschaltung der Wicklungen	20
3.3	Zickzackschaltung der Wicklungen*	22
4	Ersatzschaltungen des Drehstromtransformators in Symmetrischen Koordinaten	25
4.1	Gleichungen und Ersatzschaltungen für die Wicklungsgrößen	25
4.1.1	Zweiwicklungstransformatoren	25
4.1.2	Dreiwicklungstransformatoren	27
4.2	Ersatzschaltungen der Schaltgruppe Yy0	28
4.3	Ersatzschaltungen der Schaltgruppe Yd5	31
4.4	Ersatzschaltungen der Schaltgruppe Yy0 mit Ausgleichswicklung.....	34
4.5	Ersatzschaltungen der Schaltgruppe Yz5*	36
4.6	Einsatz der Schaltgruppen	40
4.7	Zusammenfassung - Allgemeine Ersatzschaltbilder der Zweiwicklungstransformatoren	41
5	Spartransformatoren	44
6	Regeltransformatoren	46
7	Transformatorparameter	50
7.1	Mit- und Gegensystemparameter der Zweiwicklungstransformatoren.....	50
7.2	Mit- und Gegensystemparameter der Dreiwicklungstransformatoren.....	54
7.3	Nullsystemparameter	55
8	Betriebsverhalten	57
8.1	Leerlauf	57
8.1.1	Leerlauf des Einphasentransformators.....	57
8.1.2	Leerlauf des Dreiphasentransformators	57
8.2	Kurzschluß	58
8.3	Spannungsabfall, Belastungskennlinien	59
8.4	Verluste, Wirkungsgrad, Blindleistungsbedarf	62
8.5	Parallelbetrieb	66

Hinweis: Das Skript ersetzt nicht die Vorlesung und umgekehrt. Im Skript sind einige Ausführungen, insbesondere mathematische Ableitungen ausführlicher dargestellt, während in der Vorlesung mehr Wert auf das Verständnis gelegt wird. Die mit einem * gekennzeichneten Kapitel sind zur Vertiefung gedacht.

1 Bauarten und Einsatz im Netz

Erst mit der Erfindung des Transformators war es möglich geworden, Elektroenergie über weite Entfernungen zu übertragen. 1885 erhielten die ungarischen Ingenieure Zipernowsky, Déri und Bláthy ein Patent auf ein Stromverteilungssystem mit einem Ringkerntransformator, der den Urtyp unserer heutigen Transformatoren darstellt. Er befindet sich in den Sammlungen des Deutschen Museums in München. Im gleichen Jahr nimmt die Firma Ganz in Budapest die Produktion von Transformatoren auf. Bereits bei der ersten Drehstromübertragung von Lauffen nach Frankfurt im Jahr 1891 wird ein 100-kVA-Drehstromtransformator mit einem Dreischenkelnkern mit der heute üblichen Anordnung der drei Schenkel in einer Ebene eingesetzt.

Mit der Erfindung des Öltransformators 1912 beginnt die Ära der Transformatoren großer und größter Leistung. Das Öl dient gleichzeitig als Isolier- und Kühlmittel. Um die Auswirkung der Brände von Öltransformatoren einzudämmen, hatte man zwischenzeitlich dem Transformatorenöl polychlorierte Biphenyle zugesetzt (sog. PCB-Transformatoren), bis man auf die Gefahr der Freisetzung von Schadstoffen bei Bränden von PCB-Transformatoren aufmerksam wurde.

Seit 1965 werden Gießharztransformatoren (Trockentransformatoren), bei denen die aus Aluminium bestehenden Wicklungen unter Vakuum in den Isolierstoff Gießharz eingegossen werden, gefertigt. Die Leistungsgrenze von Gießharztransformatoren scheint bei 15 MVA erreicht zu sein, während Öltransformatoren für den Bahntransport bis 1600 MVA und für den Schifffahrttransport bei 2000 MVA gebaut werden können. Die Einteilung der Transformatoren in der Elektroenergieversorgung erfolgt nach der Bauart und dem Einsatz im Netzbetrieb. Wir unterscheiden nach der Bauart zunächst zwischen *Einphasen-* und *Dreiphasen-* oder *Drehstromtransformatoren*. Einphasentransformatoren kommen bei der Bahnstromversorgung und als Sondertransformatoren für die Industrie z. B. als Gleichrichtertransformatoren, Ofentransformatoren oder Anlaßtransformatoren zur Anwendung. Die konventionellen Strom- und Spannungswandler sind ebenfalls Einphasentransformatoren in Sonderausführung für den Kurzschluß- und Leerlaufbetrieb.

Dreiphasentransformatoren können entweder aus drei Einphasentransformatoren zusammengeschaltet werden (sog. *Drehstrombänke*) oder als eine Einheit mit speziell konstruierten Kernen aufgebaut sein. Die Drehstrombank hat den Vorteil, daß zur Reservehaltung nur ein Einphasentransformator (ein Pol) bereitgehalten werden muß und bei größten Einheiten keine Transportprobleme auftreten. Nach der Anzahl der Drehstromsysteme, die durch den Transformator gekoppelt werden, sprechen wir von *Zweiwicklungs-* und *Dreiwicklungstransformatoren*. Sind die Wicklungen galvanisch getrennt, handelt es sich um *Volltransformatoren*. *Spartransformatoren* oder *Autotransformatoren* haben einen Teil der Wicklung, die sog. Parallelwicklung, gemeinsam und deshalb eine geringere Baugröße als ein Volltransformator gleicher Leistung. Nach den Spannungsebenen werden die Wicklungen von Zweiwicklungs- und Dreiwicklungstransformatoren als *Oberspannungs(OS)-* und *Unterspannungs(US)wicklung* und bei Dreiwicklungstransformatoren als *Oberspannungs-, Mittelspannungs-(MS)wicklung* und *Unterspannungswicklung* bezeichnet. Daneben sind auch die Bezeichnungen *Primär-, Sekundär- und Tertiärwicklung* üblich. Die Zuordnung dieser Bezeichnungen zu den Spannungsebenen ist nicht eindeutig. Oft wird die energieaufnehmende Wicklung als Primär- und die energieabgebende Wicklung als Sekundärwicklung bezeichnet. Da diese Festlegung aber bei wechselnder Energieflußrichtung nicht sinnvoll ist, wollen wir vereinbaren, daß Primär- und Oberspannungswicklung und Sekundär- und Unterspannungswicklung i.f. stets identisch sein sollen. Die Tertiärwicklung von Dreiwicklungstransformatoren kann als Ausgleichswicklung eine separate Spannungs-

ebene haben oder als Leistungswicklung der gleichen Spannungsebene wie die Primär- oder Sekundärwicklung angehören.

Die Symbolik der Zwei- und Dreiwicklungs-Drehstromtransformatoren zeigt Bild 1.1.

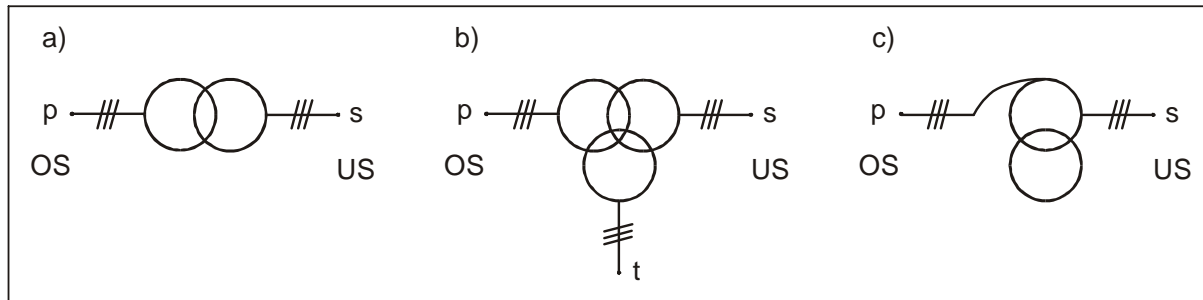


Bild 1.1: Transformatorsymbole

a) Zweiwicklungs-Volltransformator

b) Dreiwicklungs-Volltransformator

c) Zweiwicklungs-Spartransformator mit Ausgleichswicklung

Im Aufbau der Wicklungen unterscheidet man zwischen *Röhren-* oder *Zylinderwicklungen* und *Scheibenwicklungen*. Röhrenwicklungen sind radial um die Schenkelachse des Eisenkerns angeordnet, während Scheibenwicklungen aus axial nebeneinander liegenden Spulen bestehen (Bild 1.2).

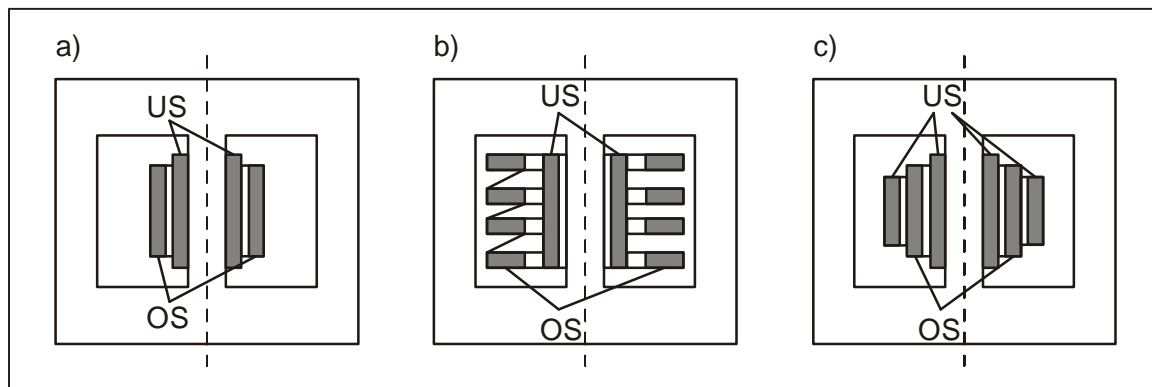


Bild 1.2: Schnitt durch einen Einphasen-Zweiwicklungstransformator

a) mit Röhrenwicklungen

b) mit Röhrenwicklung für die US-Seite und Scheibenwicklung für die OS-Seite

c) doppelkonzentrische Röhrenwicklung

Die Unterspannungswicklung besteht bis 30 kV aus Röhrenwicklungen und wird aus isolationstechnischen Gründen unmittelbar am Schenkel angeordnet. Zur Verringerung der Streuung zwischen den Wicklungen wird die Unterspannungswicklung auch auf einen inneren und äußeren Zylinder verteilt, wodurch die *doppelkonzentrische* Röhrenwicklung nach Bild 1.2 c) entsteht. Der tatsächliche Wicklungsaufbau von Großtransformatoren ist wesentlich komplizierter als die Grundformen in Bild 1.2. Die Wicklungen setzen sich aus verschiedenen zusammenschalteten und geschickt verschachtelten Spulen zusammen, womit man Stromverdrängungseffekten und Resonanzerscheinungen bei Überspannungen begegnet und die erforderliche mechanische Festigkeit bei Kurzschlüssen erreicht.

Die Wicklungen der Drehstromtransformatoren können prinzipiell als *Stern*(λ)-, *Dreieck*(Δ)- oder *Zickzack*(\sim)schaltung zum Drehstromsystem zusammenschaltet werden. Durch Kombination dieser Schaltungsmöglichkeiten entstehen die sog. *Schaltgruppen*. Von den theoretisch möglichen 42 Schaltgruppen haben aber nur 4 die sog. *Vorzugsschaltgruppen* praktische Bedeutung (DIN VDE 0532). Die Auswahl

der Schaltgruppen erfolgt nach wirtschaftlichen und isolationstechnischen Gesichtspunkten im Normalbetrieb und nach dem Verhalten gegenüber Oberschwingungen und Unsymmetriezuständen sowie der Sternpunktbelastbarkeit, worauf wir in Kapitel 6 eingehen werden.

Vom Aufbau des Transformators interessiert uns besonders die *Kernbauart*, weil von ihr - wie wir noch sehen werden - das Verhalten des Transformators bei unsymmetrischer Belastung und bei unsymmetrischen Fehlern abhängt. Einphasentransformatoren werden als *Kern-* oder *Manteltransformator* ausgeführt (Bild 1.3).

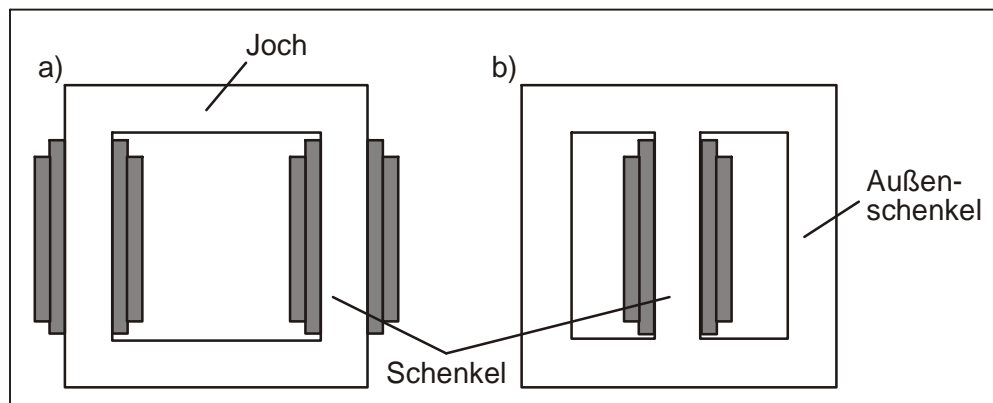


Bild 1.3: Aufbau des Eisenkreises für den Einphasentransformator

- a) Kerntransformator
- b) Manteltransformator

Die OS- und US-Wicklung müssen beim Kerntransformator ineinandergeschachtelt bleiben und werden je zur Hälfte auf die beiden Schenkel verteilt. Eine getrennte Anordnung von OS- und US-Wicklung je auf einen Schenkel hätte eine viel zu große Streuung zur Folge. Der bewickelte Teil des Eisenkreises heißt *Schenkel*, die anderen Teile *Joch* bzw. *Außenschenkel* oder *Rückschluß*. Die wichtigsten Kernbauformen des Drehstromtransformators sind der *Dreischenkelkern* (Bild 1.4 a)) und der *Fünfschenkelkern*.

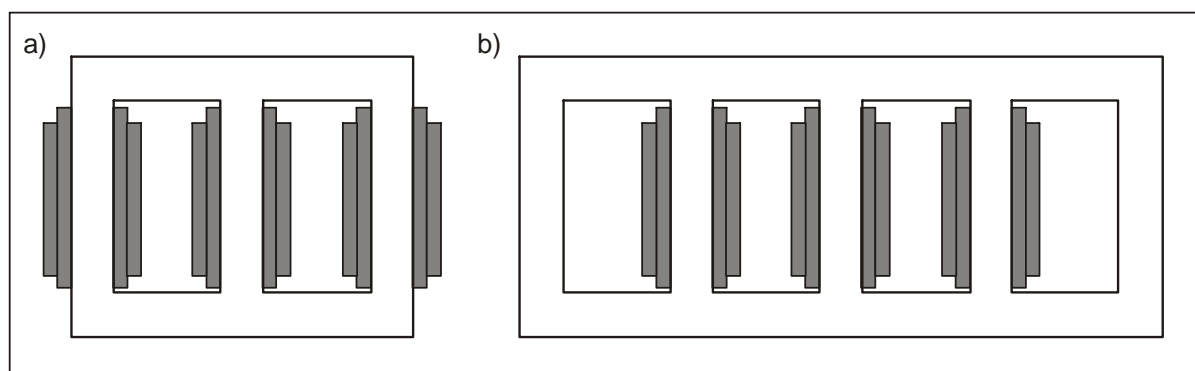


Bild 1.4: Kernbauformen des Drehstromtransformators

- a) Dreischenkelkern
- b) Fünfschenkelkern

Zur Verringerung der Wirbelstromverluste sind die Kerne aus 0,23, 0,3 oder 0,35 mm dicken, gegeneinander isolierten Blechen geschichtet. Um die Ummagnetisierungsverluste klein zu halten, wurden früher hochsilizierte Bleche eingesetzt. Heute werden kaltgewalzte Texturbleche, sog. Hi-B-Bleche, die in Walzrichtung niedrigere magnetische Feldstärken benötigen, eingesetzt, wobei man bei der Schichtung und Verzahnung der Bleche darauf achten muß, daß kein Feldverlauf quer zur Walzrich-

tung entsteht. Die Verzapfung der Joch- mit den Schenkelblechen erfolgt überlappend, wobei man je nach Zuschnitt von 90°, 45° oder 60°/30°-Verzapfungen spricht. Bei diesen Formen der Verzapfungen liegen die Stöße in jeder zweiten Blechlage immer an der gleichen Stelle. Versetzt man die Stöße in den einzelnen Blechlagen noch geringfügig zueinander, so entsteht die komplizierte, aber für die Flußführung bessere *Step-lap*-Schichtung.

Der Dreischenkeltransformator ist durch die Anordnung der Schenkel in einer Ebene magnetisch unsymmetrisch. Der Magnetisierungsstrom der Wicklungen auf dem Mittelschenkel ist kleiner als der der Wicklungen auf den beiden Außenschenkeln mit dem längerem Eisenweg. Auch besitzt der Dreischenkeltransformator keinen freien magnetischen Rückschluß, wie ihn die beiden Außenschenkel beim Fünfschenkeltransformator bilden. Auf diese Besonderheit werden wir bei der Behandlung unsymmetrischer Betriebs- und Fehlerzustände zurückkommen. Durch die beiden Außenschenkel wird das Joch beim Fünfschenkeltransformator magnetisch entlastet, so daß Fünfschenkeltransformatoren bei gleicher Leistung eine geringere Bauhöhe als Dreischenkeltransformatoren aufweisen, was beim Bahntransport größter Einheiten, der durch das Tunnelprofil mit 4,65 m Höhe beschränkt ist, von Bedeutung ist. Vorzugswerte für die *Bemessungsleistungen* von Drehstrom-Transformatoren ergeben sich nach der sog. Reihe R 10 (s. DIN 323 und DIN VDE 0532) durch Multiplikation von Basiswerten der Leistung mit Zehnerpotenzen wie folgt:

$$S_r = (6,3 \ 10 \ 16 \ 25 \ 40 \ 63) \text{ kVA} \times (1 \ 10 \ 100 \ 1000 \ 10000)$$

Die *Bemessungsspannungen* sind den Netzennennspannungen (6, 10, 20, 30, 110, 220, 380 kV) angepaßt, wobei die Aufnahmeseite von Maschinen- oder Blocktransformatoren in Kraftwerken und die Abgabeseite von Ortsnetztransformatoren eine um 5% höhere Bemessungsspannung haben.

Nach dem Einsatz im Netzbetrieb unterscheiden wir *Maschinen- oder Blocktransformatoren* (BT), *Blockeigenbedarfstransformatoren* (BET), *Netzkuppeltransformatoren*, *Verteilungstransformatoren* (VT) und *Ortsnetztransformatoren* (OT), denen jeweils auch typische Schaltgruppen eigen sind.

Das Bild 1.5 zeigt schematisch die Einsatzgebiete dieser Transformatoren. *Blocktransformatoren* heben die Spannung der Kraftwerksgeneratoren auf die Übertragungsspannung an und werden gewöhnlich als Zweiwicklungstransformatoren ausgeführt. Die Leistung ist der der Generatoren angepaßt. Es ist aber insbesondere aus Gründen der Zuverlässigkeit auch üblich, bei größten Kraftwerkseinheiten zwei Blocktransformatoren kleinerer Leistung parallel zu schalten.

Bild 1.5 zeigt auch die Möglichkeit, Kraftwerksleistung über einen Dreiwicklungs-Blocktransformator in zwei Netze (hier das 380-kV- und 220-kV-Netz) einzuspeisen, wodurch eine sichere Leistungsabführung gewährleistet wird. Die *Blockeigenbedarfstransformatoren* versorgen den Kraftwerkseigenbedarf und können als Dreiwicklungstransformatoren oder Zweiwicklungstransformatoren ausgeführt sein. *Netzkuppeltransformatoren* sind gewöhnlich Dreiwicklungstransformatoren, jedoch fungiert hier die dritte in Dreieck geschaltete Wicklung (MS-Wicklung) nur als *Ausgleichswicklung* für unsymmetrische Betriebszustände, worauf wir bei der Behandlung von unsymmetrischen Betriebszuständen eingehen werden. Sie sind als Voll- oder Spartransformatoren ausgeführt, wobei Spartransformatoren nur unter ganz bestimmten Bedingungen, wie sie bei der Kupplung des 380-kV- und 220-kV-Netzes erfüllt sind, in Frage kommen (s. Kapitel 6). Aus der Leistungsangabe 3 x 200 MVA in Bild 1.5 ist ersichtlich, daß es sich um die Zusammenschaltung von 3 Einphasentransformatoren von je 200 MVA zu einer Drehstrombank handelt. *Verteilungstransformatoren* spannen von der HS-Ebene auf die MS-Ebene und *Ortsnetztransformatoren* von der MS-

auf die Niederspannungsebene ab. Wegen der Aufteilung der Leistung auf einphasige Abnehmer müssen diese Transformatoren auf der US-Seite einen zugänglichen Sternpunkt haben. Block- und Netzkuppeltransformatoren sind als sog. *Regeltransformatoren* ausgeführt. Sie sind mit *Zusatzwicklungen* ausgerüstet, die unter Last zu- oder abgeschaltet werden können. Je nach Phasenlage der Zusatzspannung zur Spannung der *Haupt-* oder *Stammwicklung*, die meist die OS-Wicklung ist, kann der Blind- oder/und Wirkleistungsfluß im Netz beeinflusst werden (s. Kapitel 7).

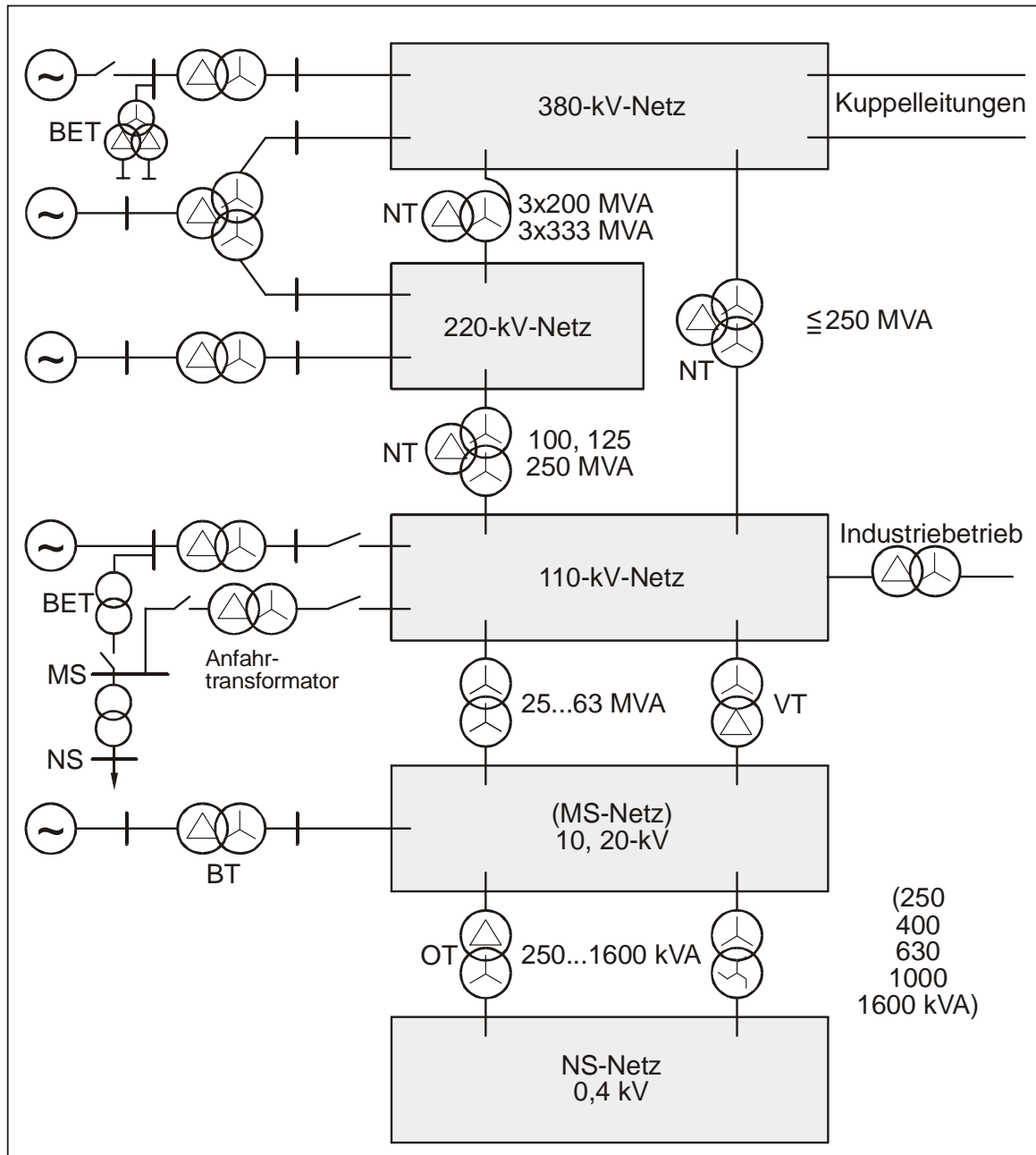


Bild 1.5: Einsatz der Transformatoren in den Netzen der Elektroenergieversorgung

2 Gleichungen und Ersatzschaltbild des Einphasentransformators

Die Gleichungen des Einphasentransformators spielen insofern eine wichtige Rolle als die Dreiphasentransformatoren durch eine Modaltransformation (z.B. in Symmetrischen Koordinaten) in ein System entkoppelter Einphasentransformatoren überführt werden können. Wir unterscheiden zunächst zwischen *Einphasen-Zweiwicklungs*transformatoren und *Einphasen-Dreiwicklungs*transformatoren.

2.1 Einphasen-Zweiwicklungstransformatoren

Das prinzipielle Wicklungsmodell zeigt Bild 2.1. Es werden rechtsgängige Wicklungen vorausgesetzt und die Zählpfeile nach dem *Verbraucherzählpfeilsystem* festgelegt.

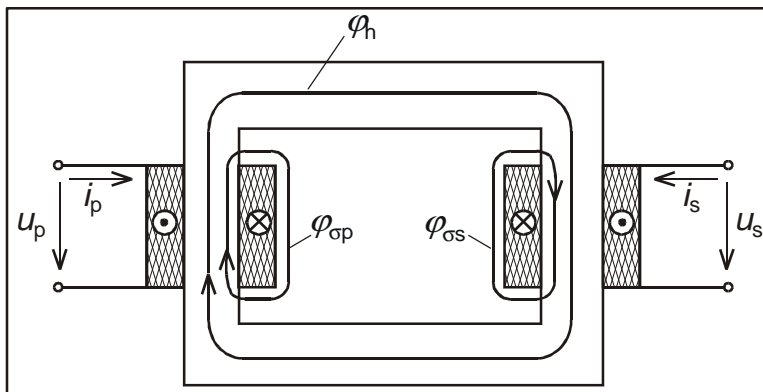


Bild 2.1: Wicklungsmodell des Zweiwicklungstransformators

Der magnetische *Hauptfluß* ϕ_h umfaßt die Primär(p)- und Sekundär(s)-Wicklung, während die *Streuflüsse* $\phi_{\sigma p}$ und $\phi_{\sigma s}$ jeweils nur mit der Primär- und der Sekundärwicklung verkettet sind. Die Wicklungen haben die Wirkwiderstände R_p und R_s . Es gelten folgende Grundgleichungen:

$$u_p = u_{hp} + u_{\sigma p} + R_p i_p = w_p \dot{\phi}_h + w_p \dot{\phi}_{\sigma p} + R_p i_p \quad (2.1)$$

$$u_s = u_{hs} + u_{\sigma s} + R_s i_s = w_s \dot{\phi}_h + w_s \dot{\phi}_{\sigma s} + R_s i_s \quad (2.2)$$

$$w_p i_p + w_s i_s = w_p i_{mp} = w_s i_{ms} \quad (2.3)$$

Die Ströme:

$$i_{mp} = i_p + \frac{w_s}{w_p} i_s \quad \text{und} \quad i_{ms} = i_s + \frac{w_p}{w_s} i_p$$

sind der primärseitige und der sekundärseitige *Magnetisierungsstrom*.

Für den Hauptfluß in den Gln. (2.1) und (2.2) folgt aus dem magnetischen Grundgesetz:

$$\varphi_h = \mu_{Fe} \frac{A_{Fe}}{l_{Fe}} (w_p i_p + w_s i_s) \quad (2.4)$$

und für die Streuflüsse:

$$\varphi_{\sigma p} = \mu_0 \frac{A_{\sigma p}}{l_{\sigma p}} w_p i_p \quad (2.5)$$

$$\varphi_{\sigma s} = \mu_0 \frac{A_{\sigma s}}{l_{\sigma s}} w_s i_s \quad (2.6)$$

wobei $A_{\sigma p}$, $A_{\sigma s}$, $l_{\sigma p}$ und $l_{\sigma s}$ fiktive geometrische Größen für den inhomogenen Streufluß sind. Die Gln. (2.1) und (2.2) gehen so über in:

$$u_p = w_p^2 \frac{\mu_{Fe} A_{Fe}}{l_{Fe}} i_p + w_p w_s \frac{\mu_{Fe} A_{Fe}}{l_{Fe}} i_s + w_p^2 \frac{\mu_0 A_{\sigma p}}{l_{\sigma p}} i_p + R_p i_p \quad (2.7)$$

$$u_s = w_s^2 \frac{\mu_{Fe} A_{Fe}}{l_{Fe}} i_s + w_s w_p \frac{\mu_{Fe} A_{Fe}}{l_{Fe}} i_p + w_s^2 \frac{\mu_0 A_{\sigma s}}{l_{\sigma s}} i_s + R_s i_s \quad (2.8)$$

Nun führen wir noch *Haupt-* und *Streuinduktivitäten* wie folgt ein:

$$L_{hp} = w_p^2 \frac{\mu_{Fe} A_{Fe}}{l_{Fe}} = \frac{w_p^2}{R_{Fe}} \quad (2.9)$$

$$L_{hs} = w_s^2 \frac{\mu_{Fe} A_{Fe}}{l_{Fe}} = \frac{w_s^2}{R_{Fe}} \quad (2.10)$$

$$L_{\sigma p} = w_p^2 \frac{\mu_0 A_{\sigma p}}{l_{\sigma p}} \quad (2.11)$$

$$L_{\sigma s} = w_s^2 \frac{\mu_0 A_{\sigma s}}{l_{\sigma s}} \quad (2.12)$$

und erhalten schließlich die drei *Grundgleichungen* des Zweiwicklungstransformators in der Form:

$$u_p = L_{hp} i_p + L_{hp} \frac{w_s}{w_p} i_s + L_{\sigma p} i_p + R_p i_p \quad (2.13)$$

$$u_s = L_{hs} i_s + L_{hs} \frac{w_p}{w_s} i_p + L_{\sigma s} i_s + R_s i_s \quad (2.14)$$

$$i_{mp} = i_p + \frac{w_s}{w_p} i_s \quad (2.15)$$

oder

$$\boxed{i_{ms} = i_s + \frac{w_p}{w_s} i_p} \quad (2.16)$$

Die Verhältnisse der Windungszahlen $n_{ps} = w_p / w_s$ oder $n_{sp} = w_s / w_p$ sind beim Einphasentransformator mit den *Übersetzungsverhältnissen* identisch. Also:

$$\ddot{u}_{ps} = n_{ps} = \frac{w_p}{w_s} = \frac{U_{rT}^p}{U_{rT}^s} \quad (2.17)$$

$$\ddot{u}_{sp} = n_{sp} = \frac{w_s}{w_p} = \frac{U_{rT}^s}{U_{rT}^p} \quad (2.18)$$

Die Grundgleichungen Gl. (2.13) bis Gl. (2.16) können weiter umgeformt werden zu:

$$u_p = L_{hp}(\dot{i}_p + \ddot{u}_{sp} \dot{i}_s) + L_{\sigma p} \dot{i}_p + R_p \dot{i}_p = L_{hp} \dot{i}_{mp} + L_{\sigma p} \dot{i}_p + R_p \dot{i}_p = u_{hp} + L_{\sigma p} \dot{i}_p + R_p \dot{i}_p \quad (2.19)$$

$$u_s = L_{hs}(\dot{i}_s + \ddot{u}_{ps} \dot{i}_p) + L_{\sigma s} \dot{i}_s + R_s \dot{i}_s = L_{hs} \dot{i}_{ms} + L_{\sigma s} \dot{i}_s + R_s \dot{i}_s = u_{hs} + L_{\sigma s} \dot{i}_s + R_s \dot{i}_s \quad (2.20)$$

Gewöhnlich rechnet man noch die Größen einer Wicklung mit dem entsprechenden Übersetzungsverhältnis auf die andere Wicklung um und kennzeichnet die umgerechneten Größen mit einem Strich im oberen Index. Rechnet man z.B. die Größen der Sekundärwicklung auf die Primärwicklung um, so wird aus Gl. (2.20):

$$\boxed{u'_s = \ddot{u}_{ps} u_s = \ddot{u}_{ps} u_{hs} + \ddot{u}_{ps}^2 L_{\sigma s} \dot{i}_s + \ddot{u}_{ps}^2 R_s \dot{i}_s = u_{hp} + L'_{\sigma s} \dot{i}'_s + R'_s \dot{i}'_s} \quad (2.21)$$

Wir sehen, daß die Spannungen mit \ddot{u}_{ps} , die Ströme mit $1/\ddot{u}_{ps} = \ddot{u}_{sp}$ und Induktivitäten und Widerstände mit \ddot{u}_{ps}^2 auf die Primärseite umgerechnet werden. Analog gilt bei Umrechnung der Primärgrößen auf die Sekundärseite:

$$\boxed{u'_p = \ddot{u}_{sp} u_p = \ddot{u}_{sp} u_{hp} + \ddot{u}_{sp}^2 L_{\sigma p} \dot{i}_p + \ddot{u}_{sp}^2 R_p \dot{i}_p = u_{hs} + L'_{\sigma p} \dot{i}'_p + R'_p \dot{i}'_p} \quad (2.22)$$

und

$$\boxed{i_{mp} = i_p + \ddot{u}_{sp} i_s = i_p + i'_s} \quad (2.23)$$

$$\boxed{i_{ms} = i_s + \ddot{u}_{ps} i_p = i_s + i'_p} \quad (2.24)$$

2.1.1 T-Ersatzschaltungen des Zweiwicklungstransformators

Aus den Gln. (2.21) bis (2.24) ergeben sich die Ersatzschaltungen in Bild 2.2.

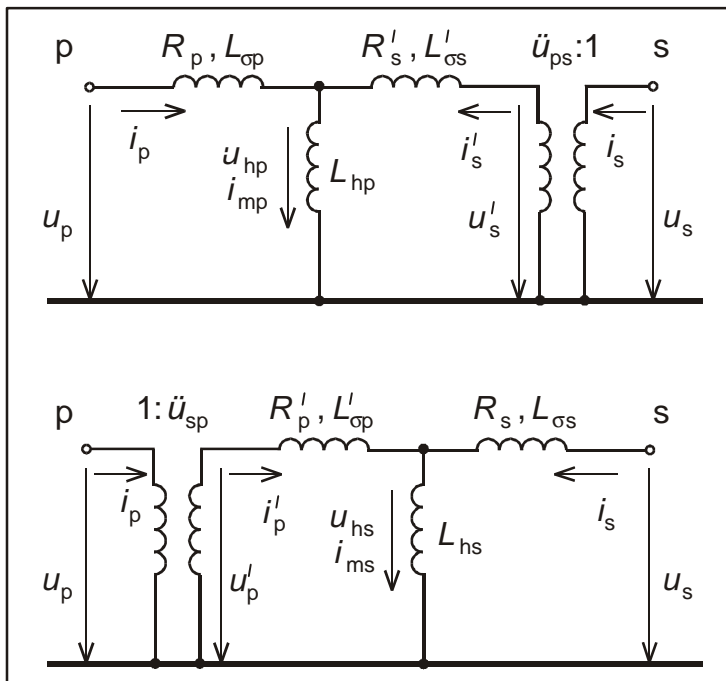


Bild 2.2: Ersatzschaltungen des Zweiwicklungstransformators mit umgerechneten Wicklungsgrößen

Einen wichtigen Sonderfall stellt die *Vernachlässigung des Magnetisierungsstromes* dar. Von dieser Näherung kann bei den Leistungstransformatoren in der Elektroenergieversorgung im Normalbetrieb gewöhnlich Gebrauch gemacht werden. Aus den Gln. (2.23) und (2.24) wird dann:

$$i_p + i'_s = i_s + i'_p = 0 \tag{2.25}$$

und die Ersatzschaltungen aus Bild 2.2 vereinfachen sich zu denen in Bild 2.3.

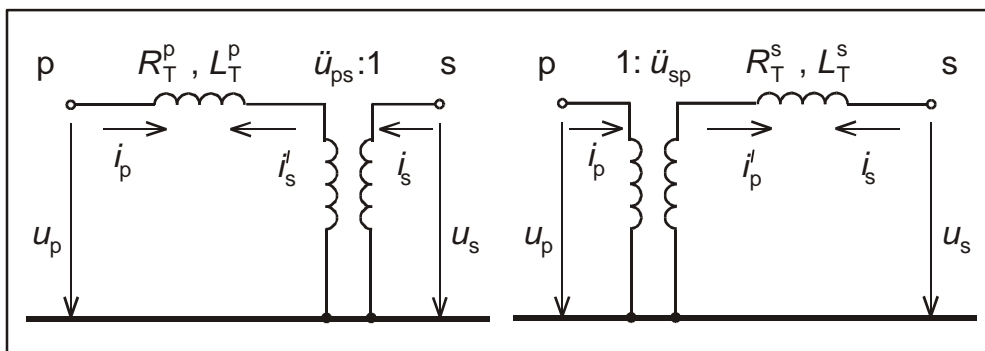


Bild 2.3: Ersatzschaltungen des Zweiwicklungstransformators mit umgerechneten Wicklungsgrößen bei Vernachlässigung des Magnetisierungsstromes

In Bild 2.3 sind die Wirkwiderstände und Streuinduktivitäten zusammengezogen zu:

$$R_p + R'_s = R_{ps}^p = R_T^p$$

$$L_{\sigma p} + L'_{\sigma s} = L_{ps}^p = L_T^p$$

bzw.:

$$R_{ps}^s = R'_p + R_s = R_{ps}^s = R_T^s = \ddot{u}_{sp}^2 R_T^p$$

$$L_{ps}^s = L'_{\sigma p} + L_{\sigma s} = L_{ps}^s = L_T^s = \ddot{u}_{sp}^2 L_T^p$$

Der Verweis auf die Wicklung, auf die die Größen umgerechnet sind (oberer Index p oder s) wird, da die Umrechnung aus der Schaltung ersichtlich ist, meist weggelassen. Die Längselemente R_T und L_T der Ersatzschaltungen in Bild 2.3 werden im Kurzschlußversuch ermittelt. Soll oder kann der Magnetisierungsstrom nicht vernachlässigt werden, wie in den Ersatzschaltungen des Bildes 2.2, so teilt man R_T und L_T gewöhnlich je zur Hälfte auf die beiden Wicklungen auf:

$$R_p = R'_s = \frac{1}{2} R_T^p \quad \text{bzw.} \quad R'_p = R_s = \frac{1}{2} R_T^s$$

$$L_{\sigma p} = L'_{\sigma s} = \frac{1}{2} L_T^p \quad \text{bzw.} \quad L'_{\sigma p} = L_{\sigma s} = \frac{1}{2} L_T^s$$

Auf den Kurzschlußversuch kommen wir später noch einmal zurück. Zunächst wollen wir aber für den *eingeschwungenen Zustand* die Differentialgleichungen des Transformators in *Zeigergleichungen* überführen. Dazu setzen wir für die Momentanwerte der eingeschwungenen Ströme und Spannungen i und u Zeiger \underline{I} und \underline{U} , und für die Ableitungen der Ströme i schreiben wir $j\omega_0 \underline{I}$, wobei ω_0 die Kreisfrequenz der Grundschwingung ist. Die Gln. (2.19), (2.20) und (2.24) gehen damit über in:

$$\underline{U}_p = \underline{U}_{hp} + (R_p + jX_{\sigma p}) \underline{I}_p = jX_{hp} \underline{I}_{mp} + \underline{Z}_{\sigma p} \underline{I}_p \quad (2.26)$$

$$\underline{U}_s = \underline{U}_{hs} + (R_s + jX_{\sigma s}) \underline{I}_s = jX_{hs} \underline{I}_{ms} + \underline{Z}_{\sigma s} \underline{I}_s \quad (2.27)$$

$$\underline{I}_{mp} = \underline{I}_p + w_{sp} \underline{I}_s \quad (2.28)$$

$$\underline{I}_{ms} = \underline{I}_s + w_{ps} \underline{I}_p \quad (2.29)$$

Aus den Gln. (2.21) und (2.22) für die umgerechneten Wicklungsgrößen wird:

$$\underline{U}'_p = \underline{U}_{hs} + (R'_p + jX'_{\sigma p}) \underline{I}'_p = jX_{hs} \underline{I}_{ms} + \underline{Z}'_{\sigma p} \underline{I}'_p \quad (2.30)$$

$$\underline{I}_{mp} = \underline{I}_p + \underline{I}'_s \quad (2.31)$$

$$\underline{U}'_s = \underline{U}_{hp} + (R'_s + jX'_{\sigma s}) \underline{I}'_s = jX_{hp} \underline{I}_{mp} + \underline{Z}'_{\sigma s} \underline{I}'_s \quad (2.32)$$

$$\underline{I}_{ms} = \underline{I}_s + \underline{I}'_p \quad (2.33)$$

Die *Reaktanzen* und *Impedanzen* werden wie die Wirkwiderstände und Induktivitäten umgerechnet. Die *Umrechnungsbeziehungen* werden im folgenden nochmals zusammengestellt. Für die Umrechnung der Zeigergrößen gelten die gleichen Regeln wie für die Momentanwerte:

$$\underline{U}'_p = \ddot{u}_{sp} \underline{U}_p; \quad \underline{I}'_p = \ddot{u}_{ps} \underline{I}_p = \frac{1}{\ddot{u}_{sp}} \underline{I}_p$$

$$\underline{U}'_s = \ddot{u}_{ps} \underline{U}_s; \quad \underline{I}'_s = \ddot{u}_{sp} \underline{I}_s = \frac{1}{\ddot{u}_{ps}} \underline{I}_s$$

$$\underline{R}'_p, \underline{X}'_{\sigma p}, \underline{Z}'_{\sigma p} = \ddot{u}_{sp}^2 (\underline{R}_p, \underline{X}_{\sigma p}, \underline{Z}_{\sigma p}); \quad \underline{R}'_s, \underline{X}'_{\sigma s}, \underline{Z}'_{\sigma s} = \ddot{u}_{ps}^2 (\underline{R}_s, \underline{X}_{\sigma s}, \underline{Z}_{\sigma s})$$

Auf der Grundlage der Gln. (2.30) bis (2.33) ergeben sich die *Impedanz-Ersatzschaltungen* in Bild 2.4.

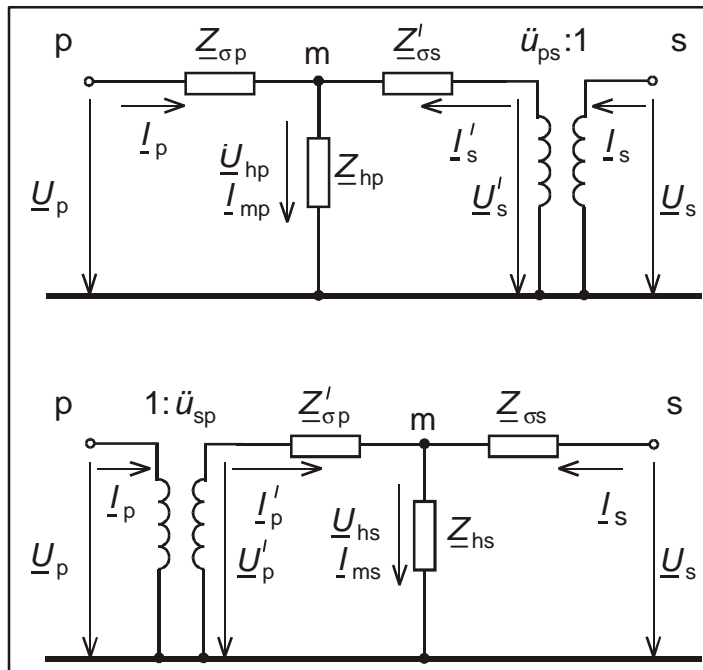


Bild 2.4: Impedanz-Ersatzschaltungen des Zweiwicklungstransformators mit umgerechneten Wicklungsgrößen (T-Ersatzschaltbild)

Bei Vernachlässigung des Magnetisierungsstromes vereinfachen sich die Ersatzschaltungen wieder durch Wegfall des Quergliedes, wie in Bild 2.5 dargestellt.

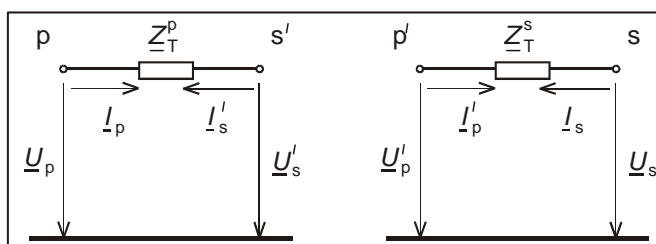


Bild 2.5: Impedanz-Ersatzschaltungen des Zweiwicklungstransformators bei Vernachlässigung des Magnetisierungsstromes

In Bild 2.5 sind noch - wie allgemein üblich - die Übertrager weggelassen. In den Impedanzen:

$$\underline{Z}_{\sigma p} + \underline{Z}'_{\sigma s} = \underline{Z}_{ps}^p = \underline{Z}_T^p$$

$$\underline{Z}'_{\sigma p} + \underline{Z}_{\sigma s} = \underline{Z}_{ps}^s = \underline{Z}_T^s$$

sind die primär- und sekundärseitigen *Widerstände* und *Streureaktanzen* zusammengefaßt, wobei jeweils die Größen einer Wicklung auf die jeweils andere umgerechnet sind.

2.1.2 Π -Ersatzschaltungen des Zweiwicklungstransformators

Die Berechnung stationärer und quasistationärer Betriebszustände in großen Elektroenergiesystemen erfolgt zweckmäßigerweise mit dem Knotenpunktverfahren, das aus den Grundlagen der Elektrotechnik auch als Knotenspannungsanalyse bekannt ist. Dazu benötigt man Stromgleichungen, zu denen sich gewöhnlich Π -Ersatzschaltungen mit Admittanzen angeben lassen¹⁾. Die Stromgleichungen erhalten wir durch Auflösen der Spannungsgleichungen aus Abschnitt 2.1.1 oder bei Kenntnis des Knotenpunktverfahrens direkt aus den dort angegebenen T-Ersatzschaltungen nach Einführung von Knotenströmen. Wir wollen die Gleichungen i.f. als Matrixgleichungen schreiben, weil sich dann die angestrebten Umformungen übersichtlicher gestalten. Aus den beiden Fenstermaschen in Bild 2.4 erhalten wir zunächst:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_p \\ \underline{U}'_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{hp} + \underline{Z}_{\sigma p} & \underline{Z}_{hp} \\ \underline{Z}_{hp} & \underline{Z}_{hp} + \underline{Z}'_{\sigma s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_p \\ \underline{I}'_s \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Die Auflösung nach den Strömen ergibt:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_p \\ \underline{I}'_s \end{bmatrix} = \frac{1}{\underline{Z}_{hp}(\underline{Z}_{\sigma p} + \underline{Z}'_{\sigma s}) + \underline{Z}_{\sigma p}\underline{Z}'_{\sigma s}} \begin{bmatrix} \underline{Z}_{hp} + \underline{Z}'_{\sigma s} & -\underline{Z}_{hp} \\ -\underline{Z}_{hp} & \underline{Z}_{hp} + \underline{Z}_{\sigma p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_p \\ \underline{U}'_s \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Um die unübersichtlichen Matrixelemente noch zu vereinfachen, soll zunächst wieder der Magnetisierungsstrom vernachlässigt werden. Wir müssen dann den Grenzübergang $\underline{Z}_{hp} \rightarrow \infty$ an Gl. (2.35) durchführen, denn für $\underline{Z}_{hp} \rightarrow \infty$ wird die Impedanzmatrix in Gl. (2.34) singulär. Der Grenzübergang liefert:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_p \\ \underline{I}'_s \end{bmatrix} = \frac{1}{\underline{Z}_{\sigma p} + \underline{Z}'_{\sigma s}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_p \\ \underline{U}'_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{ps}^p & -\underline{Y}_{ps}^p \\ -\underline{Y}_{ps}^p & \underline{Y}_{ps}^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_p \\ \underline{U}'_s \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Die Ströme \underline{I}_p und \underline{I}'_s werden wie erwartet entgegengesetzt gleich. Die Gl. (2.36) kann man bei Kenntnis des Knotenpunktverfahrens mit $\underline{Y}_{ps}^p = 1/\underline{Z}_{ps}^p$ natürlich auch sofort aus der vereinfachten Ersatzschaltung in Bild 2.5 ablesen.

Wir werden später sehen, daß man im Nullsystem den Magnetisierungsstrom nicht immer vernachlässigen kann. Da sich das Nullsystem auch durch einen (speziellen)

¹⁾ Wir haben in Abschnitt 2.1.1 gesehen, daß zur Spannungsgleichung T-Ersatzschaltungen mit Impedanzen gehören.

Einphasentransformator nachbilden läßt, wollen wir bereits hier überlegen, wie wir den Magnetisierungsstrom in der Stromgleichung bzw. in der dazu gehörenden Π -Ersatzschaltung wenigstens genähert berücksichtigen können.

Dazu bietet es sich an, in den ausführlichen Impedanzersatzschaltungen des Bildes 2.4 die Magnetisierungsimpedanzen auf die Klemmen p und s' zu verlagern. Es entstehen so die Π - oder Admittanzersatzschaltungen in Bild 2.6 mit $\underline{Y}_{ps}^p = 1/\underline{Z}_{ps}^p$ bzw. $\underline{Y}_{ps}^s = 1/\underline{Z}_{ps}^s$ und $\underline{Y}_{hp} = 1/\underline{Z}_{hp}$ bzw. $\underline{Y}_{hs} = 1/\underline{Z}_{hs}$.

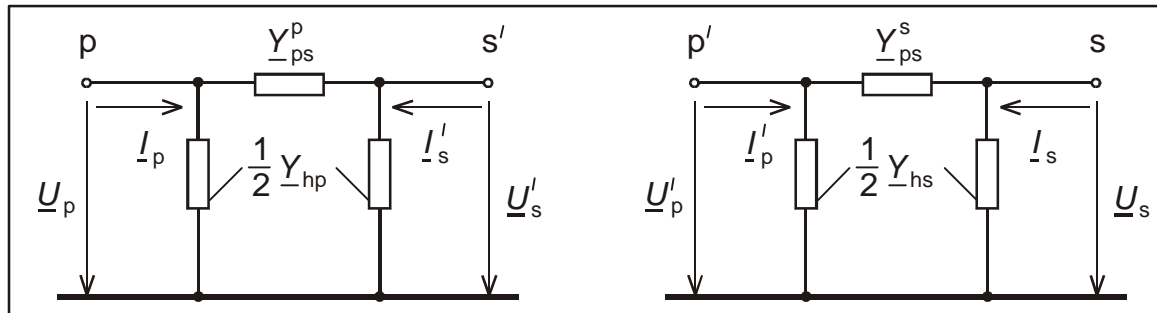


Bild 2.6: Π -Ersatzschaltungen des Zweiwicklungstransformators mit genäherter Berücksichtigung des Magnetisierungsstromes

Zur linken Ersatzschaltungen in Bild 2.6 gehört nach den Regeln der Knotenspannungsanalyse folgende Stromgleichung²⁾, die für $\underline{Y}_{hp} = 0$ in die Gl. (2.36) übergeht.

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I'_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \underline{Y}_{hp} + \underline{Y}_{ps}^p & -\underline{Y}_{ps}^p \\ -\underline{Y}_{ps}^p & \frac{1}{2} \underline{Y}_{hp} + \underline{Y}_{ps}^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_p \\ U'_s \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

2.1.3 Ermittlung der Π -Ersatzschaltung nach dem Knotenpunktverfahren*

Die direkte Aufstellung der Stromgleichung Gl. (2.35) nach dem Knotenpunktverfahren erfolgt so, daß man zunächst an jeden der drei Knoten p, m und s' in Bild 2.4 einen Knotenstrom - mit der Zählrichtung auf den Knoten hin - einführt. I_p und I'_s sind bereits solche Knotenströme, während der Strom am Knoten m Null ist. Die Knotenspannungen sind U_p , U_{hp} und U'_s . Für sie ergibt sich nach den Regeln des Knotenpunktverfahrens folgendes Gleichungssystem:

$$\begin{bmatrix} I_p \\ 0 \\ I'_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{op} & -\underline{Y}_{op} & 0 \\ -\underline{Y}_{op} & \underline{Y} & -\underline{Y}'_{os} \\ 0 & -\underline{Y}'_{os} & \underline{Y}'_{os} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_p \\ U_{hp} \\ U'_s \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

mit:

$$\underline{Y}_{op} = \frac{1}{\underline{Z}_{op}} \quad , \quad \underline{Y}'_{os} = \frac{1}{\underline{Z}'_{os}} \quad , \quad \underline{Y}_{hp} = \frac{1}{\underline{Z}_{hp}} \quad , \quad \underline{Y} = \underline{Y}_{op} + \underline{Y}'_{os} + \underline{Y}_{hp}$$

²⁾ für die rechte Ersatzschaltung in Bild 2.6 erhält man die Stromgleichung durch Vertauschen der Indizes p und s in Gl. (2.35)

In Gl. (2.38) kann der Knoten m eliminiert werden. Man erhält aus der 2. Zeile:

$$\underline{U}_{hp} = \frac{1}{\underline{Y}} \left(\underline{Y}_{\sigma p} \underline{U}_p + \underline{Y}'_{\sigma s} \underline{U}'_s \right)$$

und nach Einsetzen von \underline{U}_{hp} in Gl. (2.38):

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_p \\ \underline{I}'_s \end{bmatrix} = \frac{1}{\underline{Y}} \begin{bmatrix} \underline{Y}_{\sigma p} (\underline{Y}_{hp} + \underline{Y}'_{\sigma s}) & -\underline{Y}_{\sigma p} \underline{Y}'_{\sigma s} \\ -\underline{Y}'_{\sigma s} \underline{Y}_{\sigma p} & \underline{Y}'_{\sigma s} (\underline{Y}_{hp} + \underline{Y}_{\sigma p}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_p \\ \underline{U}'_s \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Die Elemente der so gewonnenen Admittanzmatrix müssen natürlich mit denen der Gl. (2.35) übereinstimmen. Sie sollen jetzt noch so vereinfacht werden, daß Gl. (2.39) in Gl. (2.37), die wir durch Überlegungen an der Ersatzschaltung gefunden haben, übergeht.

Unter der Bedingung $\underline{Y}_{hp} \ll \underline{Y}_{\sigma p}$, $\underline{Y}'_{\sigma s}$ können folgende Näherungen gemacht werden:

$$\frac{\underline{Y}_{\sigma p} \underline{Y}'_{\sigma s}}{\underline{Y}} \approx \frac{\underline{Y}_{\sigma p} \underline{Y}'_{\sigma s}}{\underline{Y}_{\sigma p} + \underline{Y}'_{\sigma s}} = \underline{Y}_{ps}^p$$

$$\frac{\underline{Y}_{\sigma p} \underline{Y}_{hp}}{\underline{Y}} = \frac{\underline{Y}_{\sigma p} \underline{Y}_{hp}}{(\underline{Y}_{\sigma p} + \underline{Y}'_{\sigma s}) \left(1 + \frac{\underline{Y}_{hp}}{\underline{Y}_p + \underline{Y}'_s}\right)} \approx \frac{\underline{Y}_{\sigma p}}{\underline{Y}_{\sigma p} + \underline{Y}'_{\sigma s}} \underline{Y}_{hp} = \frac{1}{2} \underline{Y}_{hp}$$

und ebenso:

$$\frac{\underline{Y}'_{\sigma s} \underline{Y}_{hp}}{\underline{Y}} = \frac{1}{2} \underline{Y}_{hp}$$

Mit diesen Näherungsausdrücken vereinfacht sich die Gl. (2.39) zu Gl. (2.37). Wir sehen andererseits aber auch, daß die zur Herleitung der Gl. (2.37) angenommene Aufteilung der Magnetisierungsadmittanz je zur Hälfte auf die primär- und sekundärseitige Klemme nur bei genügend großer Magnetisierungsimpedanz im Vergleich zu den Streuimpedanzen zulässig ist. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, so muß auf die ausführlichen Gln. (2.35) oder (2.39) zurückgegriffen werden.

2.1.4 Ersatzschaltungen des Zweiwicklungstransformators ohne Übertrager*

Die bisher beschriebenen Ersatzschaltungen mit der Umrechnung der Größen einer Wicklung auf die andere sind besonders für Handrechnungen in kleinen Netzen geeignet. Dabei ist zu beachten, daß das gesamte an der umgerechneten Wicklung angeschlossene Netz nach den gleichen Regeln wie die Wicklungsgrößen umzurechnen ist. Bei größeren Netzen und Netzen mit mehreren Spannungsebenen ist die Umrechnung auf eine Spannungsebene, die sogenannte Rechenspannungsebene, nicht mehr sinnvoll. Solange nur Netzmodelle und Analogrechner für die Netzberechnung zur Verfügung standen, und die Computer noch nicht über einen ausreichenden

Zahlenbereich verfügten, war man aber auf die Umrechnung auf eine Rechenspannungsebene oder das unübersichtliche Rechnen mit bezogenen (als p.u., von per unit, bezeichneten) Größen angewiesen. Die Ergebnisse mußten dann schließlich in die Originalspannungsebene zurückgerechnet werden.

Für die heute bevorzugte Rechnung mit Originalspannungen und -strömen braucht man Transformator-Ersatzschaltungen ohne Übertrager, die aufgrund der Bevorzugung des Knotenpunktverfahrens bei der Netzberechnung, Π - oder Admittanzersatzschaltungen sein sollten. Um sie herzuleiten und die Herleitung einfach zu gestalten, gehen wir von der Gl. (2.36), in der die Magnetisierungsströme vernachlässigt sind, aus und berücksichtigen die Magnetisierungsströme wieder nachträglich.

Die in $\underline{I}'_s = \ddot{u}_{sp} \underline{I}_s$ und $\underline{U}'_s = \ddot{u}_{ps} \underline{U}_s$ stehenden Übersetzungsverhältnisse ziehen wir jetzt in die Admittanzmatrix hinein und erhalten so:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_p \\ \underline{I}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{ps}^p & -\ddot{u}_{ps} \underline{Y}_{ps}^p \\ -\ddot{u}_{ps} \underline{Y}_{ps}^p & \ddot{u}_{ps}^2 \underline{Y}_{ps}^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_p \\ \underline{U}_s \end{bmatrix} \tag{2.40}$$

oder

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_p \\ \underline{I}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{u}_{sp}^2 \underline{Y}_{ps}^s & -\ddot{u}_{sp} \underline{Y}_{ps}^s \\ -\ddot{u}_{sp} \underline{Y}_{ps}^s & \underline{Y}_{ps}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_p \\ \underline{U}_s \end{bmatrix} \tag{2.41}$$

Die zu Gl. (2.40) und (2.41) gehörenden Π -Ersatzschaltungen mit Originalgrößen zeigt Bild 2.7. Die Querglieder dürfen jetzt auf keinen Fall vernachlässigt werden.

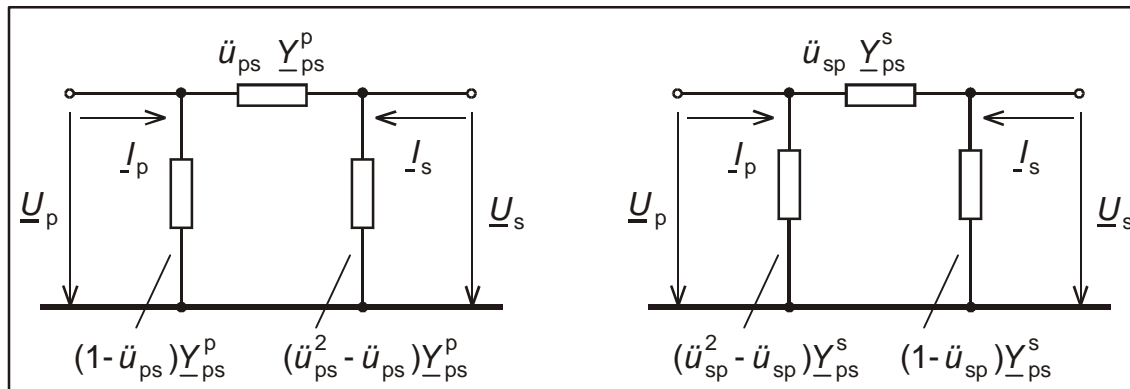


Bild 2.7: Π -Ersatzschaltungen ohne Übertrager bei Vernachlässigung des Magnetisierungsstromes

3 Schaltgruppen der Drehstromtransformatoren

Für die Zusammenschaltung der drei Wicklungen einer Seite der Drehstromtransformatoren kommen die *Stern*(\star)-, die *Dreieck*(Δ)-, oder die *Zickzack-Schaltung* (\curvearrowright) in Frage. Die Sternschaltung oder Zickzackschaltung muß immer dann verwendet werden, wenn der Sternpunkt für die direkte oder indirekte Erdung oder den Anschluß von Erdschlußkompensationsspulen und einphasigen Verbrauchern benötigt wird. Die Sternwicklung ist für hohe Spannungen wirtschaftlicher als die Dreieckwicklung, die bevorzugt auf der Unterspannungsseite, wo hohe Ströme fließen, eingesetzt wird. Die Dreieckwicklung kann einen Kreisstrom (Nullstrom) führen, der bei unsymmetrischer Belastung für eine hohe Belastbarkeit des Sternpunktes (bei Sternschaltung der anderen Wicklungsseite) sorgt. Bei der Zickzackschaltung ist die Wicklung eines Stranges je zur Hälfte auf zwei Schenkel verteilt, wodurch volle Sternpunktbelastung auf der Zickzackseite gewährleistet ist. Auf das unterschiedliche Verhalten der Schaltungsmöglichkeiten gegenüber unsymmetrischen Belastungen und Oberschwingungen wird in Kapitel 4 und Abschnitt 8.1 eingegangen.

Die Dreieck- und die Zickzack-Schaltung verursachen eine Phasendrehung zwischen den Wicklungs- und Klemmengrößen. Je nach Ausführung der Schaltung ergeben sich so Phasendrehungen von 0° bis 360° in Stufen von 30° . Die verschiedenen Kombinationen der Schaltungen der Wicklungen ergeben die *Schaltgruppen*. Jede Schaltgruppe ist durch zwei *Kennbuchstaben* für die Art der Wicklungsschaltung (Stern, Dreieck oder Zickzack) auf der Ober(OS)- und Unterspannungsseite(US) und durch die *Kennzahl* wie folgt bestimmt:

$$\text{Schaltgruppe} = \{\text{Kennbuchstabe OS}\} \{\text{Kennbuchstabe US}\} \{\text{Kennzahl } k\}$$

Die *Kennzahl* k gibt an, um das Wievielfache von 30° die Spannungszeiger des Mitsystems der OS-Seite denen der US-Seite *voreilen*. Für Dreieck- und Zickzackwicklungen sind dabei die Zeiger äquivalenter Sternschaltungen heranzuziehen. Die Kennbuchstaben gehen aus der Tabelle 3.1 hervor.

Tabelle 3.1: Kennbuchstaben der Schaltgruppen

Schaltung	Δ	\star	\curvearrowright	offen
OS-Wicklung	D	Y	Z	III
US-Wicklung	d	y	z	iii

Ist der Sternpunkt herausgeführt, so wird hinter dem Kennbuchstaben noch ein N bzw. n angefügt. So bedeutet die Schaltgruppe YNd5:

- Schaltung der Oberspannungswicklung im Stern mit herausgeführtem Sternpunkt
- Schaltung der Unterspannungswicklung im Dreieck
- Die Oberspannung eilt der Unterspannung um $5 \times 30^\circ = 150^\circ$ vor.

Das entsprechende Zeigerbild enthält Bild 3.1.

Dreiwicklungstransformatoren haben mehrere Schaltgruppenbezeichnungen. Die Angabe erfolgt in der Reihenfolge abnehmender Bemessungsspannung. Bei gleicher Bemessungsspannung zweier Wicklungen ist die Schaltgruppenbezeichnung für die Wicklung mit der höheren Bemessungsleistung S_r voranzustellen. Bei gleichem U_r und S_r ist die Dreieckschaltung vor der Sternschaltung anzugeben. So lautet z.B. die Schaltgruppenbezeichnung für einen 630-MVA-Netzkuppltransformator mit einer im

Dreieck geschalteten, für 210 MVA ausgelegten 30-kV-Ausgleichswicklung und einem Übersetzungsverhältnis von 400/231/31,5 kV:

Yy0 (400/231 kV - 630 MVA)
 Yd5 (400/31,5 kV - 210 MVA)
 Yd5 (231/31,5 kV - 210 MVA)

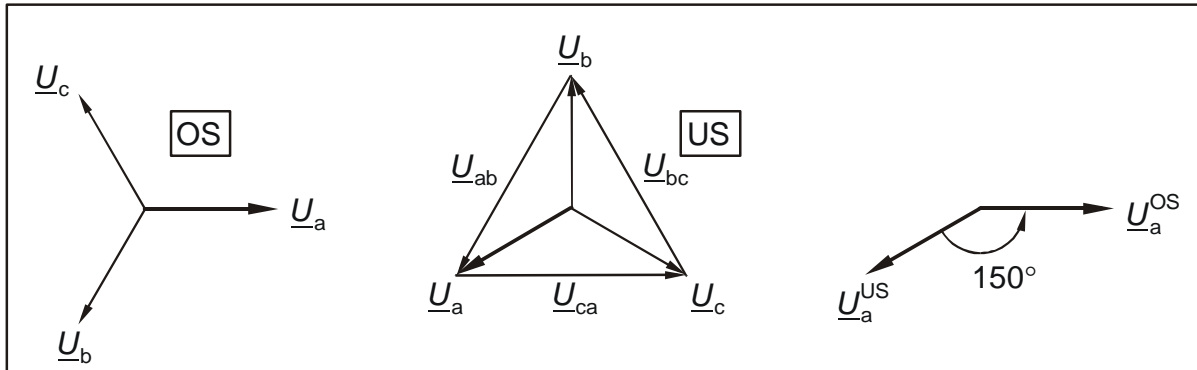


Bild 3.1: Zeigerbilder (Mitsystem) für die Schaltgruppe Yd5

Von der Gesamtzahl der 42 möglichen Schaltgruppen mit 10 verschiedenen Kennzahlen enthält die Tabelle 3.2 die 12 Wichtigsten. Die Klemmen der OS- und US-Wicklung sind dort mit U, V und W bezeichnet.

Von den in Tab. 3.2 angegebenen 12 Schaltgruppen sind wiederum nur die 4 Eingerahmten sog. *Vorzugsschaltgruppen*. Sie haben die Kennzahl 0 oder 5. Im Ausland ist auch noch die Schaltgruppe Yd11 gebräuchlich. Auf die Verwendung der Schaltgruppen werden wir in Abschnitt 4.3 eingehen, wenn wir die Ersatzschaltungen in symmetrischen Koordinaten und damit ihr Verhalten gegenüber Unsymmetriezuständen, insbesondere gegenüber einem Nullsystem, behandelt haben werden.

Tabelle 3.2: Auswahl von Schaltgruppen nach DIN VDE 0532

Kennzahl	Schaltgruppe	Zeigerbild		Schaltungsbild	
		OS	US	OS	US
0	D d 0				
	Y y 0				
	D z 0				
5	D y 5				
	Y d 5				
	Y z 5				
6	D d 6				
	Y y 6				
	D z 6				
11	D y 11				
	Y d 11				
	Y z 11				

3.1 Sternschaltung der Wicklungen

In der Sternschaltung nach Bild 3.2 sind die Wicklungsgrößen zur Unterscheidung von den Klemmengrößen mit W im oberen Index gekennzeichnet. Die Sternpunkt-Erde-Impedanz \underline{Z}_M soll zunächst einen endlichen Wert haben. Für den Fall des freien Sternpunktes lassen wir später \underline{Z}_M gegen Unendlich gehen.

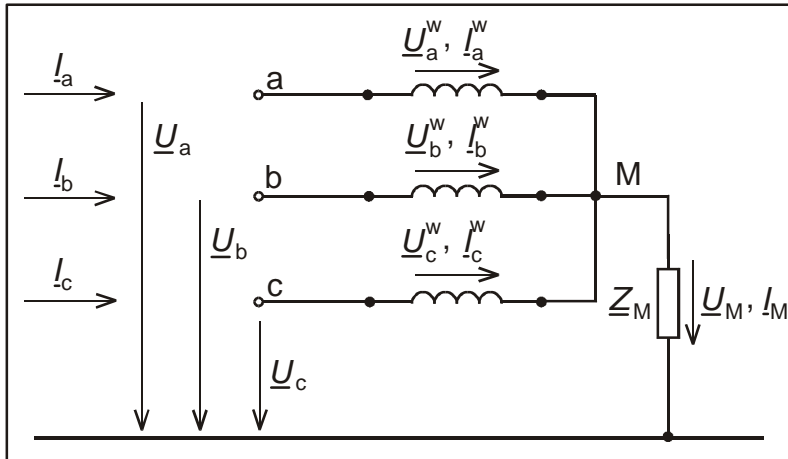


Bild 3.2: Sternschaltung der Wicklungen

Wicklungs- und Klemmengrößen sind nach den Maschen- und Knotensätzen folgendermaßen verknüpft:

$$\begin{aligned}\underline{U}_a^W &= \underline{U}_a - \underline{U}_M \\ \underline{U}_b^W &= \underline{U}_b - \underline{U}_M \\ \underline{U}_c^W &= \underline{U}_c - \underline{U}_M\end{aligned}\quad (3.1)$$

$$\begin{aligned}\underline{I}_a^W &= \underline{I}_a \\ \underline{I}_b^W &= \underline{I}_b \\ \underline{I}_c^W &= \underline{I}_c\end{aligned}\quad (3.2)$$

Ist \underline{Z}_M endlich, so gilt wegen $\underline{I}_M = \underline{I}_a^W + \underline{I}_b^W + \underline{I}_c^W = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c$:

$$\underline{U}_M = \underline{Z}_M \underline{I}_M = \underline{Z}_M (\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c) = \underline{Z}_M 3 \underline{I}_0 \quad (3.3)$$

Für das *Mit-* und *Gegensystem* der Symmetrischen Komponenten ergibt sich wegen $\underline{U}_M = 0$:

$$\begin{aligned}\underline{U}_1^W &= \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2^W &= \underline{U}_2\end{aligned}\quad (3.4)$$

und ebenso für die Ströme:

$$\begin{cases} I_1^W = I_1 \\ I_2^W = I_2 \end{cases} \quad (3.5)$$

Für das Nullsystem wird mit Gl. (3.3):

$$\begin{cases} U_0^W = U_0 - U_M = U_0 - 3Z_M I_0 \\ I_0^W = I_0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Mit Hilfe der Gl. (3.4) bis (3.6) lassen sich so die Symmetrischen Komponenten der Wicklungsgrößen durch die Symmetrischen Komponenten der Klemmengrößen ersetzen. Bild 3.3 veranschaulicht die Zusammenhänge. Es tritt keinerlei Phasendrehung zwischen Wicklungs- und Klemmengrößen auf. Eine Sternpunkt-Erde-Impedanz geht mit ihrem dreifachen Wert in das Nullsystem und nur in das Nullsystem ein.

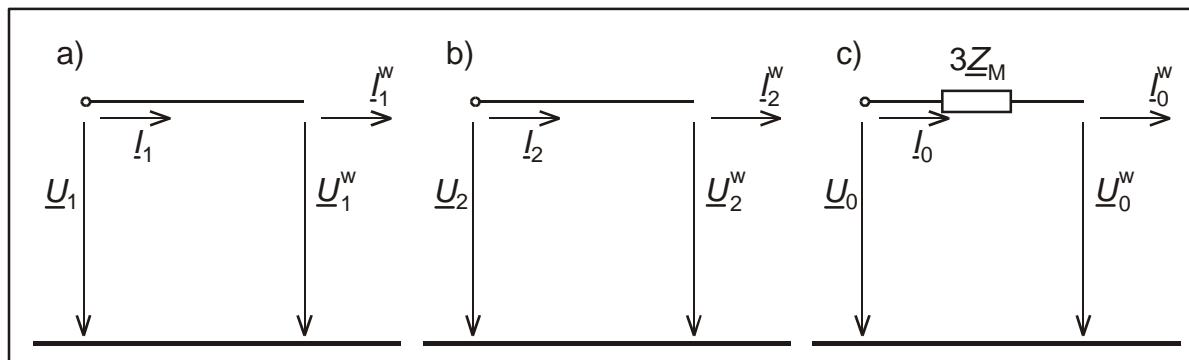


Bild 3.3: Zusammenhänge der Wicklungs- und Klemmengrößen der Symmetrischen Komponenten bei der Sternschaltung a) Mitsystem b) Gegensystem c) Nullsystem

3.2 Dreieckschaltung der Wicklungen

Für die Dreieckschaltung gibt es die zwei Möglichkeiten nach Bild 3.4:

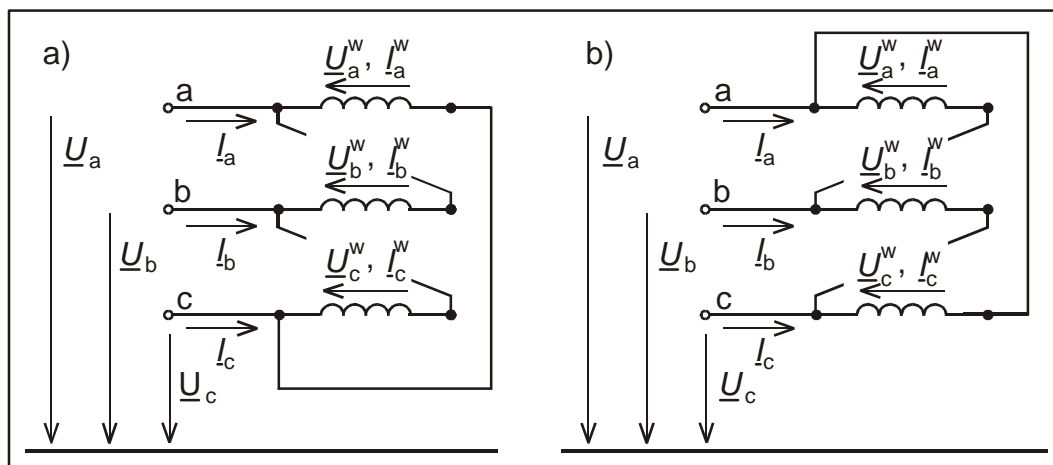


Bild 3.4: Dreieckschaltungen der Wicklungen

Bei der Schaltung nach Bild 3.4a bestehen folgende Zusammenhänge zwischen Wicklungs- und Klemmengrößen:

$$\begin{aligned}\underline{U}_a^W &= -\underline{U}_a + \underline{U}_c \\ \underline{U}_b^W &= -\underline{U}_b + \underline{U}_a \\ \underline{U}_c^W &= -\underline{U}_c + \underline{U}_b\end{aligned}\quad (3.7)$$

und

$$\begin{aligned}I_a &= -I_a^W + I_b^W \\ I_b &= -I_b^W + I_c^W \\ I_c &= -I_c^W + I_a^W\end{aligned}\quad (3.8)$$

Die Gl. (3.8) kann nicht wie bei der Sternschaltung nach den Wicklungsströmen aufgelöst werden. Um den Zusammenhang zwischen den Wicklungs- und Klemmengrößen der Symmetrischen Komponenten zu erhalten, setzen wir der Reihe nach die Bedingungen für ein Mit- Gegen- und Nullsystem in die Gl. (3.7) und (3.8) ein. Für ein Mitsystem folgt so aus Gl. (3.7) mit $\underline{U}_a = \underline{U}_1$ und $\underline{U}_c = \underline{a}\underline{U}_1$:

$$\underline{U}_1^W = -\underline{U}_1 + \underline{a}\underline{U}_1 = (\underline{a} - 1)\underline{U}_1 = \sqrt{3}e^{j150^\circ} \underline{U}_1 = \underline{m}_5 \underline{U}_1 \quad (3.9)$$

und aus Gl. (3.8) mit $I_a^W = I_1^W$ und $I_b^W = \underline{a}^2 I_1^W$:

$$I_1 = (\underline{a}^2 - 1)I_1^W \quad (3.10)$$

Die Gl. (3.10) läßt sich nun nach dem Wicklungsstrom auflösen:

$$I_1^W = \frac{1}{(\underline{a}^2 - 1)} I_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} e^{j150^\circ} I_1 = \frac{1}{\underline{m}_5^*} I_1 \quad (3.11)$$

Die Klemmengrößen des Mitsystems \underline{U}_1 und I_1 werden gegenüber den Wicklungsgrößen \underline{U}_1^W und I_1^W jeweils um $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$ zurückgedreht. Oder: Im Mitsystem eilen die Wicklungsgrößen den Klemmengrößen um 150° vor. Analog erhält man für die Gegensystemgrößen mit $\underline{U}_a = \underline{U}_1$ und $\underline{U}_c = \underline{a}^2 \underline{U}_1$:

$$\underline{U}_2^W = -\underline{U}_2 + \underline{a}^2 \underline{U}_2 = (\underline{a}^2 - 1)\underline{U}_2 = \sqrt{3}e^{-j150^\circ} \underline{U}_2 = \underline{m}_5^* \underline{U}_2 \quad (3.12)$$

und:

$$I_2 = (\underline{a} - 1)I_2^W \quad (3.13)$$

oder:

$$I_2^W = \frac{1}{(\underline{a} - 1)} I_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} e^{j150^\circ} I_2 = \frac{1}{\underline{m}_5} I_2 \quad (3.14)$$

Im Gegensystem eilen demzufolge die Klemmengrößen den Wicklungsgrößen um 150° vor.

Für das Nullsystem liefern die Gl. (3.7) und (3.8) die Bedingungen:

$$\boxed{U_0^W = 0} \tag{3.15}$$

und:

$$\boxed{I_0 = 0} \tag{3.16}$$

Diese beiden Bedingungen sind typisch für die Dreieckschaltung. In Bild 3.5 sind die Zusammenhänge zwischen den Wicklungs- und Klemmengrößen für das Mit- und Gegensystem durch Übertrager mit den komplexen Übersetzungsverhältnissen \underline{m}_5 und \underline{m}_5^* ausgedrückt. Im Nullsystem bedeutet die Gl. (3.16) eine Unterbrechung zwischen Klemme und Wicklung, während Gl. (3.15) einen Kurzschluß der Wicklung ausdrückt.

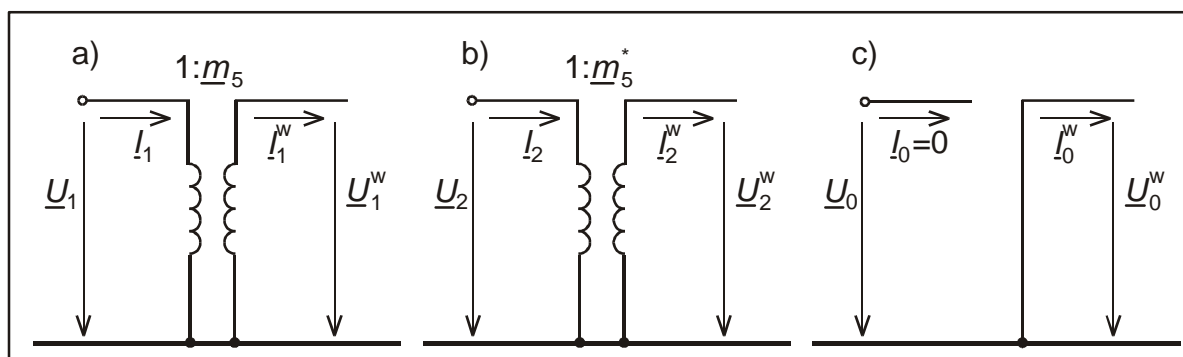


Bild 3.5: Zusammenhänge der Wicklungs- und Klemmengrößen der Symmetrischen Komponenten bei der Dreieckschaltung nach Bild 3.4a a) Mitsystem b) Gegensystem c) Nullsystem

Untersucht man die Dreieckschaltung in Bild 3.4b in gleicher Weise, so stellt man fest, daß sie ein Mit- und Gegensystem gerade anders herum dreht, wie die Schaltung nach Bild 3.4a. Für das Nullsystem gelten die Gln. (3.15) und (3.16) gleichermaßen.

3.3 Zickzackschaltung der Wicklungen*

Bei der Zickzackschaltung wird jeder Wicklungsstrang in zwei Hälften aufgeteilt und auf zwei Schenkel verteilt.

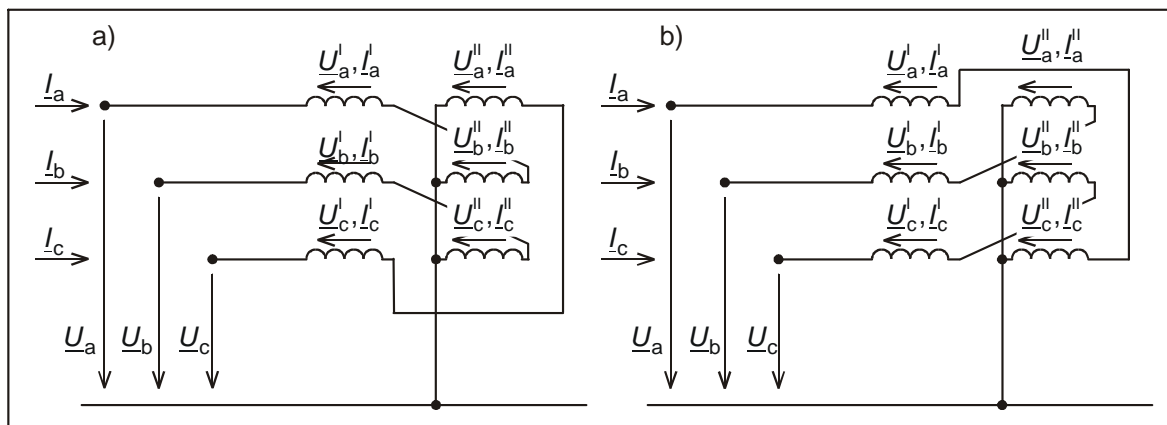


Bild 3.6: Zickzackschaltungen der Wicklungen

Auf einem Schenkel sind so jeweils zwei Hälften unterschiedlicher Wicklungsstränge gegeneinander geschaltet. Dafür gibt es die beiden Schaltungsmöglichkeiten nach Bild 3.6. Aus Bild 3.6a folgt nach dem Maschensatz:

$$\begin{aligned}\underline{U}_a &= -\underline{U}_a^I + \underline{U}_b^II \\ \underline{U}_b &= -\underline{U}_b^I + \underline{U}_c^II \\ \underline{U}_c &= -\underline{U}_c^I + \underline{U}_a^II\end{aligned}\quad (3.17)$$

und nach dem Knotenpunktsatz:

$$\begin{aligned}\underline{I}_a^I &= -\underline{I}_a & \underline{I}_a^II &= \underline{I}_c \\ \underline{I}_b^I &= -\underline{I}_b & \underline{I}_b^II &= \underline{I}_a \\ \underline{I}_c^I &= -\underline{I}_c & \underline{I}_c^II &= \underline{I}_b\end{aligned}\quad (3.18) \quad (3.19)$$

Für ein *Mitsystem* gilt $\underline{U}_a^I = \underline{U}_1^I$ und $\underline{U}_b^II = \underline{a}^2 \underline{U}_1^II$, womit Gl. (3.17) übergeht in:

$$\boxed{\underline{U}_1 = -\underline{U}_1^I + \underline{a}^2 \underline{U}_1^II}\quad (3.20)$$

Für die Ströme ergibt sich:

$$\boxed{\begin{aligned}\underline{I}_1^I &= -\underline{I}_1 \\ \underline{I}_1^II &= \underline{a} \underline{I}_1\end{aligned}}\quad (3.21)$$

und somit:

$$\boxed{\underline{I}_1^I + \underline{I}_1^II = (\underline{a} - 1) \underline{I}_1 = \underline{m}_5 \underline{I}_1}\quad (3.22)$$

Für die *Gegensystemgrößen* erhält man:

$$\boxed{\underline{U}_2 = -\underline{U}_2^I + \underline{a} \underline{U}_2^II}\quad (3.23)$$

und:

$$\boxed{\begin{aligned}\underline{I}_2^I &= -\underline{I}_2 \\ \underline{I}_2^II &= \underline{a}^2 \underline{I}_2\end{aligned}}\quad (3.24)$$

also:

$$\boxed{\underline{I}_2^I + \underline{I}_2^II = (\underline{a}^2 - 1) \underline{I}_2 = \underline{m}_5^* \underline{I}_2}\quad (3.25)$$

Für die *Nullsystemgrößen* wird:

$$\boxed{\underline{U}_0 = -\underline{U}_0^I + \underline{U}_0^II}\quad (3.26)$$

sowie:

$$\begin{cases} I_0^I = -I_0^II \\ I_0^II = I_0^I \end{cases} \quad (3.27)$$

und damit:

$$I_2^I + I_2^II = 0 \quad (3.28)$$

Das Bild 3.7 interpretiert die durch die Gln. (3.20) bis (3.28) gegebenen Schaltungsbedingungen mit Hilfe von idealen Übertragern.

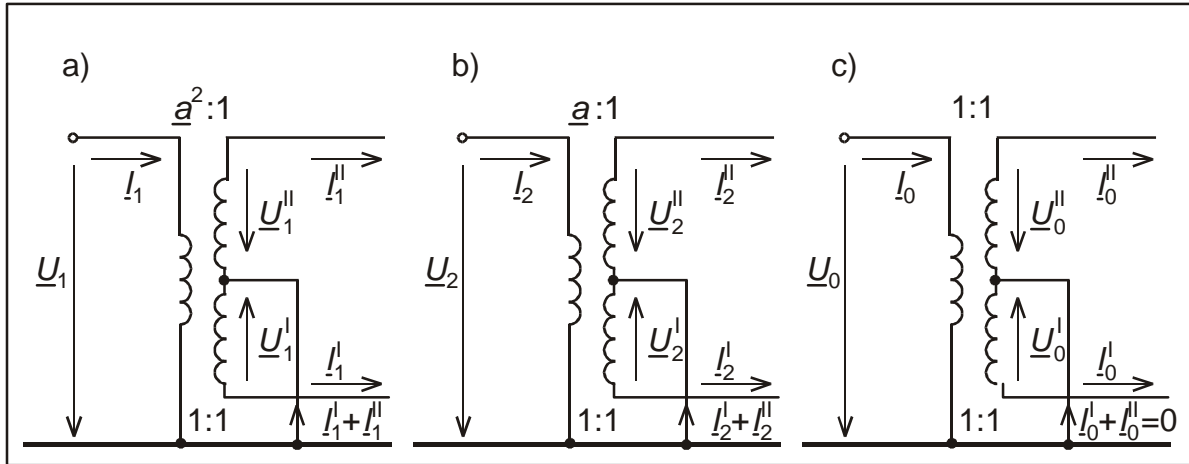


Bild 3.7: Zusammenhänge der Wicklungs- und Klemmengrößen der Symmetrischen Komponenten bei der Zickzackschaltung nach Bild 3.6a a) Mitsystem b) Gegensystem c) Nullsystem

4 Ersatzschaltungen des Drehstromtransformators in Symmetrischen Koordinaten

4.1 Gleichungen und Ersatzschaltungen für die Wicklungsgrößen

4.1.1 Zweiwicklungstransformatoren

Wir denken uns zunächst den Drehstromtransformator aus drei Einphasentransformatoren zu einer Drehstrombank zusammengeschaltet. Dann gelten die Gln. (2.30) bis (2.33) des Einphasentransformators auch für jeden dieser drei Einphasentransformatoren. Die Primär- und Sekundärwicklungen der Einphasentransformatoren bezeichnen wir jeweils mit a, b und c und kennzeichnen die Wicklungsgrößen wieder durch W im oberen Index. Die Sekundärgrößen sollen mit dem *Wicklungs-Übersetzungsverhältnis* n_{ps} auf die Primärseite umgerechnet sein (Index '). Die drei Spannungsgleichungen einer Wicklungsseite fassen wir zu je einer Matrixgleichung zusammen und erhalten so:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{pa}^W \\ \underline{U}_{pb}^W \\ \underline{U}_{pc}^W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{\sigma p} & & \\ & \underline{Z}_{\sigma p} & \\ & & \underline{Z}_{\sigma p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{pa}^W \\ \underline{I}_{pb}^W \\ \underline{I}_{pc}^W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{U}_{hpa} \\ \underline{U}_{hpb} \\ \underline{U}_{hpc} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{sa}^{W'} \\ \underline{U}_{sb}^{W'} \\ \underline{U}_{sc}^{W'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{\sigma s} & & \\ & \underline{Z}_{\sigma s} & \\ & & \underline{Z}_{\sigma s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{sa}^{W'} \\ \underline{I}_{sb}^{W'} \\ \underline{I}_{sc}^{W'} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{U}_{hpa} \\ \underline{U}_{hpb} \\ \underline{U}_{hpc} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Ebenso verfahren wir mit den Hauptfeldspannungen und Magnetisierungsströmen:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{hpa} \\ \underline{U}_{hpb} \\ \underline{U}_{hpc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} jX_{hp} & & \\ & jX_{hp} & \\ & & jX_{hp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{mpa} \\ \underline{I}_{mpb} \\ \underline{I}_{mpc} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \underline{I}_{mpa} \\ \underline{I}_{mpb} \\ \underline{I}_{mpc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{pa}^W \\ \underline{I}_{pb}^W \\ \underline{I}_{pc}^W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{I}_{sa}^{W'} \\ \underline{I}_{sb}^{W'} \\ \underline{I}_{sc}^{W'} \end{bmatrix} \quad (4.3) \quad (4.4)$$

Die vorstehenden Gleichungen behalten aufgrund der Diagonalform der Matrizen ihre Form auch nach Transformation in die Symmetrischen Koordinaten (Indizes 1,2,0) bei:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{p1}^W \\ \underline{U}_{p2}^W \\ \underline{U}_{p0}^W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{\sigma p} & & \\ & \underline{Z}_{\sigma p} & \\ & & \underline{Z}_{\sigma p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{p1}^W \\ \underline{I}_{p2}^W \\ \underline{I}_{p0}^W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{U}_{hp1} \\ \underline{U}_{hp2} \\ \underline{U}_{hp0} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{s1}^{W'} \\ \underline{U}_{s2}^{W'} \\ \underline{U}_{s0}^{W'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}'_{\sigma s} & & \\ & \underline{Z}'_{\sigma s} & \\ & & \underline{Z}'_{\sigma s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{s1}^{W'} \\ \underline{I}_{s2}^{W'} \\ \underline{I}_{s0}^{W'} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{U}_{hp1} \\ \underline{U}_{hp2} \\ \underline{U}_{hp0} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{hp1} \\ \underline{U}_{hp2} \\ \underline{U}_{hp0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} jX_{hp} & & \\ & jX_{hp} & \\ & & jX_{hp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{mp1} \\ \underline{I}_{mp2} \\ \underline{I}_{mp0} \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \begin{bmatrix} \underline{I}_{mp1} \\ \underline{I}_{mp2} \\ \underline{I}_{mp0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{p1}^W \\ \underline{I}_{p2}^W \\ \underline{I}_{p0}^W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{I}_{s1}^{W'} \\ \underline{I}_{s2}^{W'} \\ \underline{I}_{s0}^{W'} \end{bmatrix} \quad (4.7) \text{ und } (4.8)$$

Auf der Grundlage der Gln. (4.5) bis (4.8) erhalten wir die Ersatzschaltungen für die Symmetrischen Komponenten der *Wicklungsgrößen* in Bild 4.1. Sie entsprechen der Ersatzschaltung des Einphasentransformators aus Bild 2.4.

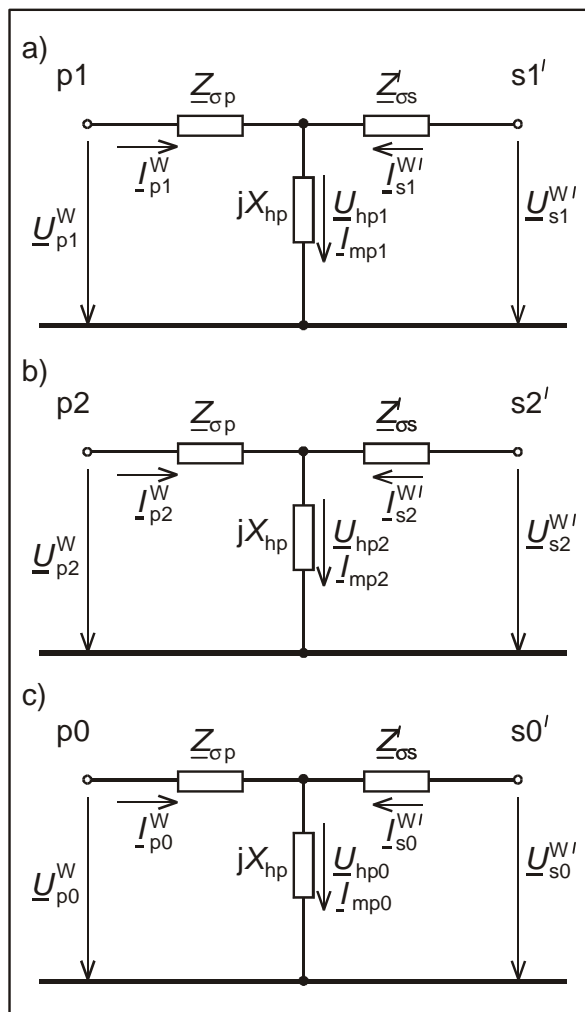


Bild 4.1: Ersatzschaltungen für die Symmetrischen Komponenten der Wicklungsgrößen des Dreiphasen-Zweiwicklungstransformators
 a) Mitsystem b) Gegensystem c) Nullsystem

Die Drehstrombank stellt einen ideal symmetrischen Drehstromtransformator dar. Dadurch, daß jeder der drei Einphasentransformatoren einen eigenen magnetischen Kreis hat, kann sich auch ein Nullfluß auf dem magnetischen Hauptweg ausbilden, so daß kein Unterschied zwischen der Hauptfeldreaktanz im Mit-, Gegen- und Nullsystem besteht. Für den als Fünfschenkel- oder Dreischenkelkern ausgeführten Dreh-

stromtransformator gelten die Ersatzschaltungen in Bild 4.1 mit gewissen Einschränkungen. Sie berücksichtigen nicht die durch den Kernaufbau bedingte magnetische Unsymmetrie und nicht den Einfluß des unterschiedlichen magnetischen Rückschlusses auf die Hauptfeldreaktanz des Nullsystems.

Da die Magnetisierungsströme ohnehin in den meisten Betriebszuständen vernachlässigbar sind, kann auf eine Berücksichtigung der magnetischen Unsymmetrie verzichtet werden.

Nicht mehr generell zu vernachlässigen ist dagegen der Einfluß der *Kernbauart* auf die Hauptfeldreaktanz des Nullsystems. Während sich beim Fünfschenkelkern ein Nullfluß über die beiden unbewickelten Außenschenkel auf dem Eisenweg schließen kann und dort etwa den gleichen kleinen magnetischen Widerstand wie ein Mit- oder Gegenfluß vorfindet, muß er sich beim Dreischenkelkern teilweise über Luft und den Kessel schließen, wo ihm ein wesentlich größerer magnetischer Widerstand als im Eisen entgegengebracht wird. Die Hauptfeldreaktanz des Nullsystems ist deshalb beim Fünfschenkelkern wie bei der Drehstrombank etwa gleich der des Mit- und Gegensystems und beim Dreischenkeltransformator wesentlich kleiner als die des Mit- und Gegensystems. Beim Dreischenkelkern hat die Hauptfeldreaktanz des Nullsystems nur noch die Größenordnung von $(4...8)X_{ps}$ und darf deshalb nicht mehr von vornherein vernachlässigt werden. Um keine unterschiedlichen Bezeichnungen für die Hauptfeldreaktanzen in den Ersatzschaltungen einführen zu müssen, berücksichtigen wir i. f. den Einfluß der Kernbauart auf die Hauptreaktanz des Nullsystems durch einen Faktor k_0 an X_{hp} im Nullsystem. Für die Transformatoren mit freiem magnetischen Rückschluß (Drehstrombank und Fünfschenkeltransformator) ist $k_0 = 1$ und für den Dreischenkeltransformator $k_0 < 1$.

4.1.2 Dreiwicklungstransformatoren

Die Gleichungen aus Abschnitt 4.1.1 werden um die Spannungsgleichung der dritten Wicklung, der *Tertiärwicklung*, ergänzt, wobei die Größen der Tertiärwicklung mit dem Verhältnis der Windungszahlen n_{pt} auf die Primärwicklung umgerechnet sein sollen.

Wir geben gleich die Gleichungen in Symmetrischen Koordinaten an. Die Spannungsgleichung lautet in Analogie zu Gl. (4.6):

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{t1}^{W'} \\ \underline{U}_{t2}^{W'} \\ \underline{U}_{t0}^{W'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}'_{ot} & & \\ & \underline{Z}'_{ot} & \\ & & \underline{Z}'_{ot} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{t1}^{W'} \\ \underline{I}_{t2}^{W'} \\ \underline{I}_{t0}^{W'} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{U}_{hp1} \\ \underline{U}_{hp2} \\ \underline{U}_{hp0} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Die Magnetisierungsströme setzen sich jetzt aus den Strömen aller drei Wicklungen wie folgt zusammen:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{mp1} \\ \underline{I}_{mp2} \\ \underline{I}_{mp0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{p1}^W \\ \underline{I}_{p2}^W \\ \underline{I}_{p0}^W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{I}_{s1}^{W'} \\ \underline{I}_{s2}^{W'} \\ \underline{I}_{s0}^{W'} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{I}_{t1}^{W'} \\ \underline{I}_{t2}^{W'} \\ \underline{I}_{t0}^{W'} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Die Erweiterung der Ersatzschaltungen um die Tertiärwicklung zeigt Bild 4.2. Die Ersatzschaltungen für die Wicklungsgrößen in den Bildern 4.1 und 4.2 sind unveränder-

licher Bestandteil aller Ersatzschaltungen für die einzelnen Schaltgruppen. Um die Ersatzschaltung für eine spezielle Schaltgruppe zu entwickeln, sollte man deshalb stets von diesem inneren Zusammenhang ausgehen und anschließend die Verknüpfung zwischen Wicklungs- und Klemmengrößen nach den in Kapitel 3 angegebenen allgemeinen Beziehungen ergänzen. Im folgenden sollen auf diesem Weg exemplarisch die Ersatzschaltungen der Schaltgruppen Yy0, Yd5 und Yz5 hergeleitet werden.

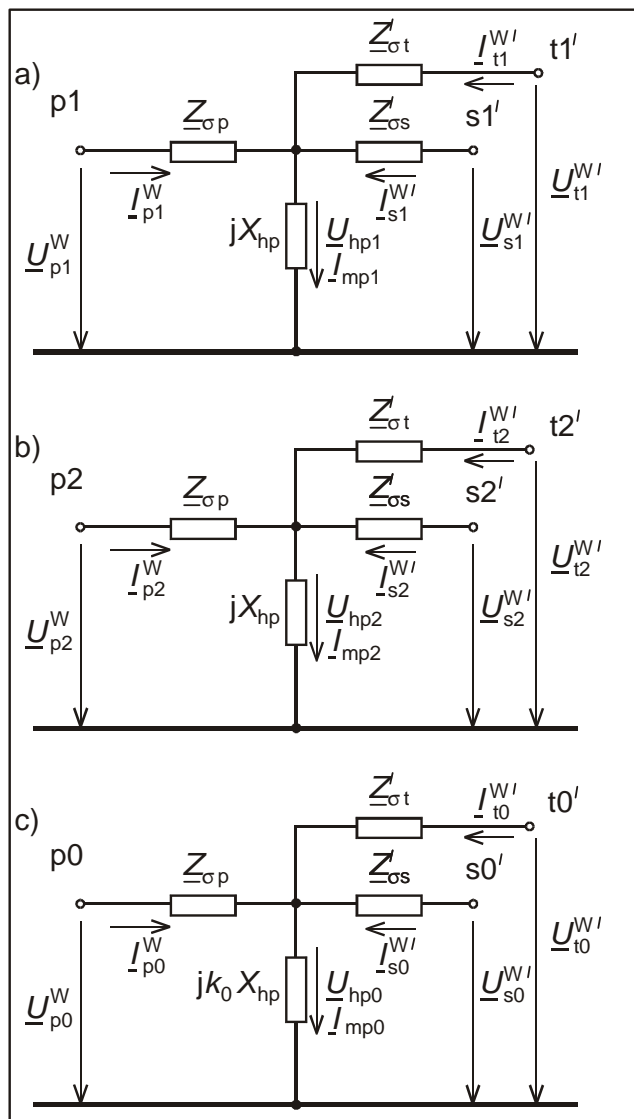


Bild 4.2: Ersatzschaltungen für die Symmetrischen Komponenten der Wicklungsgrößen des Dreiphasen-Dreiwicklungstransformators
 a) Mitsystem b) Gegensystem c) Nullsystem

4.2 Ersatzschaltungen der Schaltgruppe Yy0

Wir wollen zunächst den einfachsten Fall, die *Schaltgruppe* Yy0 mit beidseitig widerstandslos geerdeten Sternpunkten betrachten. Die entsprechende Schaltung der Wicklungsgrößen und die Zählpfeile für die Wicklungs- und Klemmengrößen zeigt Bild 4.3.

Es ist sofort ersichtlich, daß wegen $\underline{U}_{Mp} = \underline{U}'_{Ms} = 0$ Klemmen- und Wicklungsspannungen gleich werden. Die Klemmen- und Wicklungsströme sind bei der Sternschaltung unabhängig von der Art der Sternpunkterdung stets identisch (s. Gln. (3.1) und

(3.2)). Also gelten für den Sonderfall der starren Erdung beider Sternpunkte alle Gleichungen für die Wicklungsgrößen aus Abschnitt 4.1.1 auch für die Klemmengrößen und die Ersatzschaltungen für die Klemmengrößen entsprechen denen für die Wicklungsgrößen. Sie sind in Bild 4.4 angegeben, wobei die gestrichelt umrahmten Kästen die unveränderlichen Zusammenhänge zwischen den Wicklungsgrößen beinhalten.

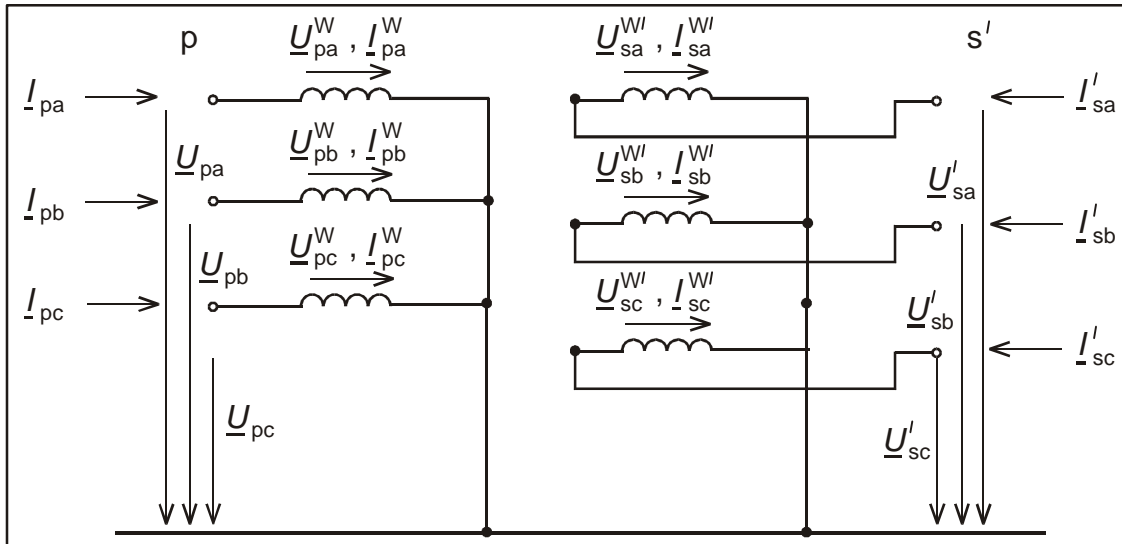


Bild 4.3: Schaltung des Zweiwicklungstransformators mit der Schaltgruppe Yy0.

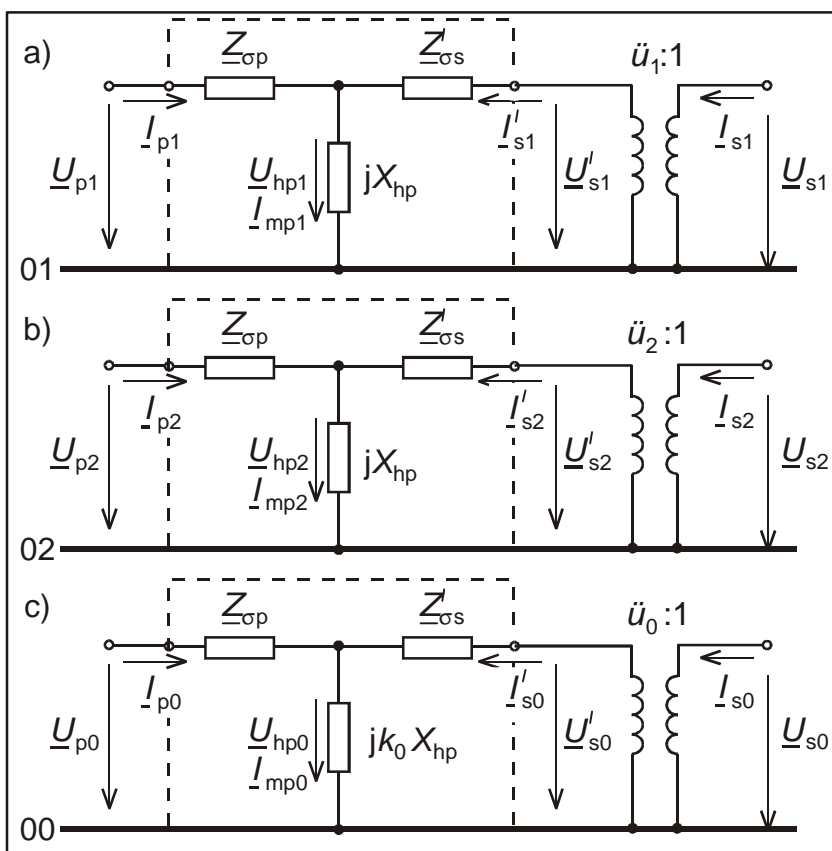


Bild 4.4: Ersatzschaltungen für die Symmetrischen Komponenten des Zweiwicklungstransformators mit der Schaltgruppe Yy0 bei beidseitig widerstandslos geerdeten Sternpunkten
 a) Mitsystem b) Gegensystem c) Nullsystem

Die als Verhältnis der Bemessungswerte der Klemmenspannungen definierten Übersetzungsverhältnisse \ddot{u}_1 , \ddot{u}_2 und \ddot{u}_0 für das Mit-, Gegen- und Nullsystem stimmen bei der Schaltgruppe Yy0 mit dem Wicklungs-Übersetzungsverhältnis n_{ps} überein:

$$\ddot{u}_1 = \ddot{u}_2 = \ddot{u}_0 = n_{ps} = \frac{w_p}{w_s} = \frac{U_{rT}^p}{U_{rT}^s} \tag{4.11}$$

In den Ersatzschaltungen werden die Übersetzungsverhältnisse durch ideale Übertrager nachgebildet. Jede der Ersatzschaltungen in Bild 4.4 entspricht der des Einphasen-Zweiwicklungstransformators in Bild 2.2.

Ist auf einer Seite der Sternpunkt nicht widerstandslos geerdet, sondern entweder frei oder über eine Impedanz Z_M niederohmig oder auf Erdschlußkompensation abgestimmt geerdet, so ist davon nur das Nullsystem betroffen. Nach Gl. (3.4) besteht dann im Nullsystem folgender Zusammenhang zwischen den Wicklungs- und Klemmengrößen dieser Seite:

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_0^W + \underline{U}_M = \underline{U}_0^W + 3Z_M I_0$$

$$I_0 = I_0^W \tag{4.12}$$

In der Ersatzschaltung des Nullsystems ist auf der betreffenden Seite die entsprechende dreifache Sternpunkt-Erde-Impedanz hinzuzufügen. In Bild 4.5a ist der Fall dargestellt, daß beide Sternpunkte über eine Impedanz geerdet sind.

Für den Fall des freien Sternpunktes wird die entsprechende Impedanz Z_M unendlich groß. Damit entsteht im Nullsystem eine Unterbrechung zwischen der Primär- und der Sekundärseite, und die Eingangsimpedanz der betreffenden Seite wird ebenfalls unendlich groß.

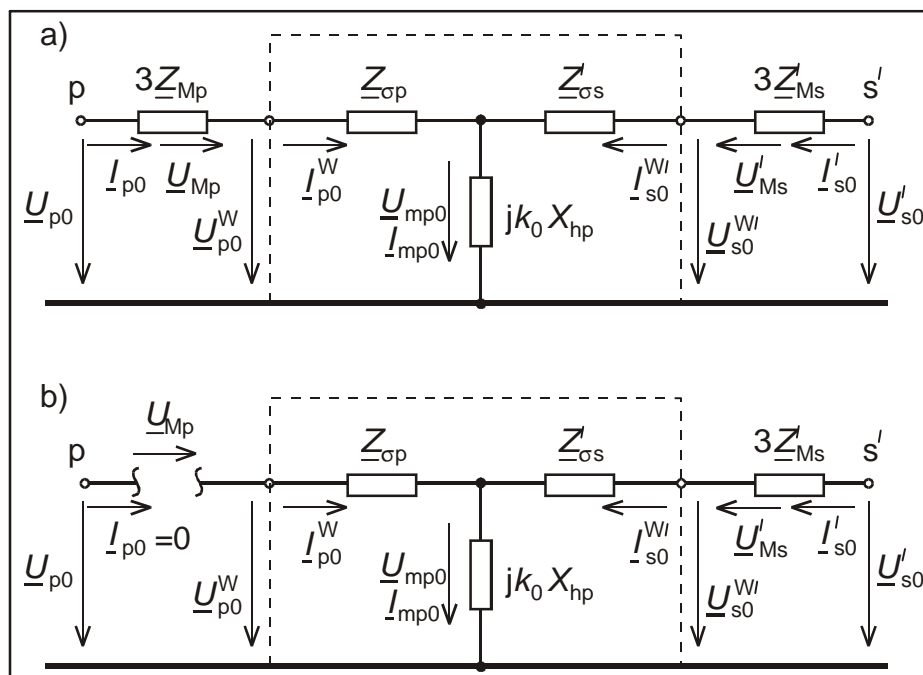


Bild 4.5: Nullsystemersatzschaltbilder des Zweiwicklungstransformators mit der Schaltgruppe Yy0

a) Sternpunkte über Z_{Mp} und Z_{Ms} geerdet

b) Sternpunkt auf Primärseite frei, auf Sekundärseite über Z_{Ms} geerdet

In Bild 4.5b ist der Sternpunkt auf der Primärseite nicht geerdet. Ein Nullsystem auf der Sekundärseite würde den Transformator ohne Gegendurchflutung magnetisieren. Es hängt dann wieder von der Kernbauart ab, ob sich dieser Magnetisierungs-nullfluß kräftig oder schwach ausbildet und eine entsprechend große oder kleine Nullspannung, die sich als Verlagerungsspannung \underline{U}_{Ms} am freien Sternpunkt äußert, verursacht. Bei *Fünfschenkeltransformatoren* und *Drehstrombänken* ($k_0 = 1$) bildet sich über den freien magnetischen Rückschluß ein kräftiger Nullfluß und damit eine so starke Spannungsverlagerung aus, daß diese Transformatoren praktisch überhaupt nicht sternpunktbelastbar sind. Bei *Dreischenkeltransformatoren* ($k_0 < 1$) wird der Nullfluß durch seine Verdrängung aus dem Eisenkreis begrenzt, so daß auch die Verlagerungsspannung nicht so groß wird. Mit Rücksicht auf eine nicht zu große magnetische Belastung des Kessels, der im wesentlichen den magnetischen Rückschluß bildet, dürfen die Sternpunkte dieser Transformatoren mit 10 % des Bemessungsstromes belastet werden.

4.3 Ersatzschaltungen der Schaltgruppe Yd5

Alle Schaltgruppen außer der Schaltgruppe Yy0 bewirken im Mit- und Gegensystem eine Phasendrehung zwischen den Klemmengrößen *desselben* Stranges (s. Kapitel 3). Sie heißen deshalb auch *phasendrehende* Schaltgruppen. Das Bild 4.6 zeigt die Schaltung der Wicklungen von Primär- und Sekundärseite zur Schaltgruppe Yd5 mit geerdetem Sternpunkt auf der Primärseite.

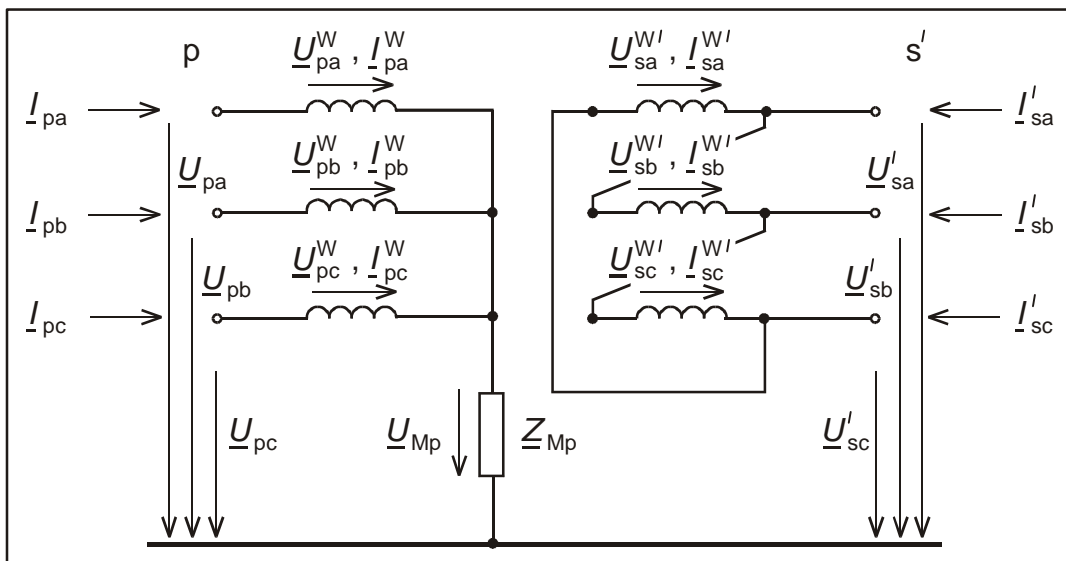


Bild 4.6: Schaltung und Zählpfeile des Zweiwicklungstransformators mit der Schaltgruppe Yd5

Wir entwickeln die in Bild 4.7 angegebenen Ersatzschaltungen für die Symmetrischen Komponenten wieder ausgehend von den Wicklungsgrößen. Die Primärseite ist im Stern geschaltet und somit wie in Bild 4.4 für das Mit- und Gegensystem und wie in Bild 4.5 für das Nullsystem bis zu den Klemmen zu ergänzen.

Die Verknüpfungsbeziehungen zwischen den Klemmen- und Wicklungsgrößen für die Dreieckschaltung der Sekundärseite lauten nach Abschnitt 3.2 im *Mitsystem*:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{s1}^W &= m_5 \underline{U}'_{s1} \\ \underline{I}_{s1}^W &= \frac{1}{m_5^*} \underline{I}'_{s1} \end{aligned} \tag{4.13}$$

im *Gegensystem*:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{s2}^{W'} &= \underline{m}_5^* \underline{U}'_{s2} \\ \underline{I}_{s2}^{W'} &= \frac{1}{\underline{m}_5} \underline{I}'_{s2} \end{aligned} \tag{4.14}$$

und im *Nullsystem*:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{s0}^{W'} &= 0 \\ \underline{I}'_{s0} &= 0 \end{aligned} \tag{4.15}$$

Die Gln. (4.13) und (4.14) werden durch ideale Übertrager mit komplexen Übersetzungsverhältnissen im Mit- und Gegensystem berücksichtigt. Das Übersetzungsverhältnis für das *Mitsystem* ist:

$$\underline{m}_1 = \underline{m}_5 = \sqrt{3} \angle 150^\circ = \sqrt{3} \angle 5 \cdot 30^\circ$$

und das für das *Gegensystem*:

$$\underline{m}_2 = \underline{m}_5^* = \sqrt{3} \angle -150^\circ = \sqrt{3} \angle -5 \cdot 30^\circ = \underline{m}_1^*$$

Die Übertrager sorgen für die Phasendrehung der Schaltgruppe. Bei der Schaltgruppe Yd5 eilt die primärseitige Klemmenspannung des Mitsystems entsprechend der Kennzahl 5 gegenüber der sekundärseitigen Klemmenspannung um 150° vor.

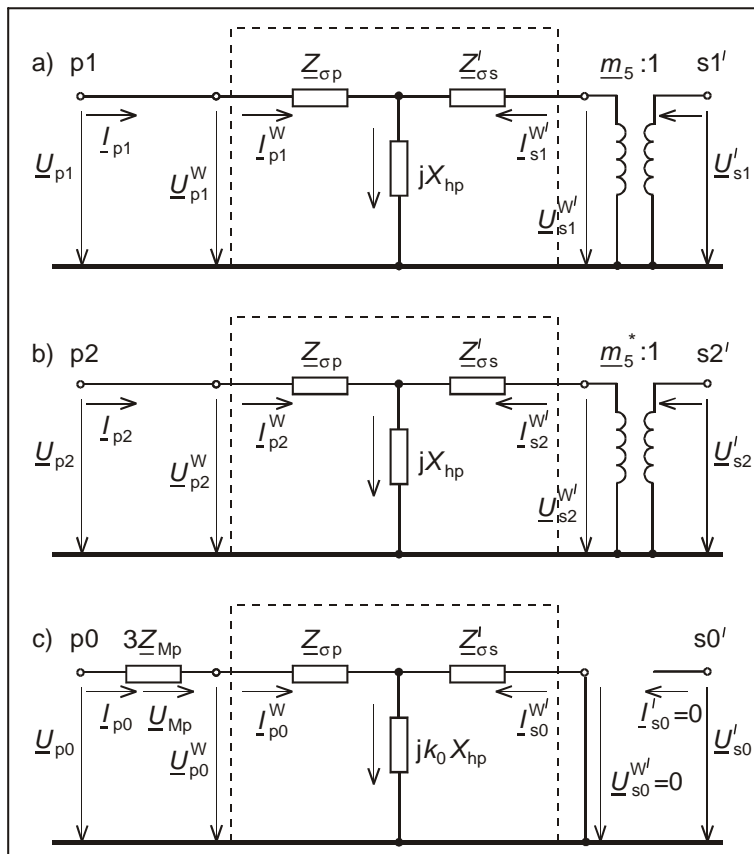


Bild 4.7: Ersatzschaltungen der Symmetrischen Komponenten für die Schaltgruppe Yd5 nach Bild 4.6
 a) Mitsystem b) Gegensystem c) Nullsystem

Die Gegensystemgrößen werden bekanntlich im entgegengesetzten Sinn wie die Mitsystemgrößen gedreht, was im konjugiert komplexen Übersetzungsverhältnis der beiden Übertrager in Bild 4.7a und b zum Ausdruck kommt.

Im Nullsystem besteht auf der Sekundärseite wegen der Bedingung $I'_{s0} = 0$ (s. Gl. (4.15)) keine Verbindung zwischen der Wicklung und der Klemme. Die Bedingung $U_{s0}^{W'} = 0$ ist durch einen Kurzschluß der Sekundärwicklung erfüllt. Somit kann die Schaltgruppe Yd5 kein Nullsystem zwischen Primär- und Sekundärseite übertragen. Die primärseitige Eingangsimpedanz des Nullsystems ist bei geerdetem Sternpunkt endlich, die der Sekundärwicklung dagegen unendlich.

Fügt man in Bild 4.7 auf der Sekundärseite noch reelle Übertrager mit dem Wicklungs-Übersetzungsverhältnis $n_{ps} = w_p / w_s$ hinzu, so entstehen die Ersatzschaltungen in Bild 4.8 mit den Original-Klemmengrößen auch auf der Sekundärseite.

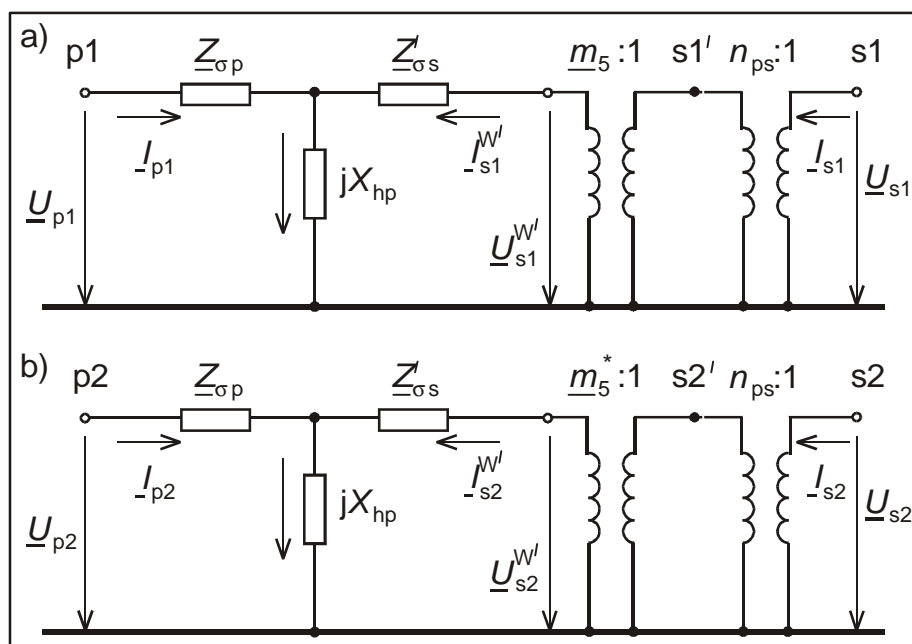


Bild 4.8: Ersatzschaltungen des Zweiwicklungstransformators der Schaltgruppe Yd5 mit Original-Klemmengrößen
 a) Mitsystem b) Gegensystem

Die Übertrager in Bild 4.8 können zusammengefaßt werden zu Übertragern mit den Übersetzungsverhältnissen:

$$\underline{\dot{u}}_1 = \underline{m}_5 n_{ps} = \sqrt{3} \frac{w_p}{w_s} \angle 150^\circ = \underline{\dot{u}} \angle 150^\circ \tag{4.16}$$

und:

$$\underline{\dot{u}}_2 = \underline{m}_5^* n_{ps} = \underline{\dot{u}}_1^* = \underline{\dot{u}} \angle -150^\circ \tag{4.17}$$

Der Betrag des Übersetzungsverhältnisses ergibt sich aus dem Verhältnis der primär- und sekundärseitigen Bemessungsspannungen:

$$\underline{\dot{u}} = \sqrt{3} \frac{w_p}{w_s} = \frac{U_{rT}^p}{U_{rT}^s}$$

Für die Umrechnung der sekundärseitigen Klemmengrößen auf die Primärseite gilt in Analogie zum Einphasentransformator unter Beachtung der komplexen Übersetzungsverhältnisse:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{s1}^{W'} &= \underline{\ddot{u}}_1 \underline{U}_{s1} & \text{und} & & \underline{I}_{s1}^{W'} &= \frac{1}{\underline{\ddot{u}}_1^*} \underline{I}_{s1} \\
 \underline{U}_{s2}^{W'} &= \underline{\ddot{u}}_2 \underline{U}_{s2} & \text{und} & & \underline{I}_{s2}^{W'} &= \frac{1}{\underline{\ddot{u}}_2^*} \underline{I}_{s2} \\
 \underline{Z}'_{\sigma s} &= \underline{\ddot{u}}_1 \underline{\ddot{u}}_1^* = \underline{\ddot{u}}^2 \underline{Z}_{\sigma s} = 3 \left(\frac{W_p}{W_s} \right)^2 \underline{Z}_{\sigma s}
 \end{aligned}
 \tag{4.19}$$

wobei $\underline{Z}_{\sigma s}$ die Impedanz einer äquivalenten Sternwicklung auf der Sekundärseite ist. Mit den Übertragern $\underline{\ddot{u}}_1$ und $\underline{\ddot{u}}_2 = \underline{\ddot{u}}_1^*$ ergeben sich schließlich die *allgemeinen* Ersatzschaltungen des Mit- und Gegensystems in Bild 4.9. Sie entsprechen der Ersatzschaltung des Einphasentransformators in Bild 2.2 mit komplexen Übertragern.

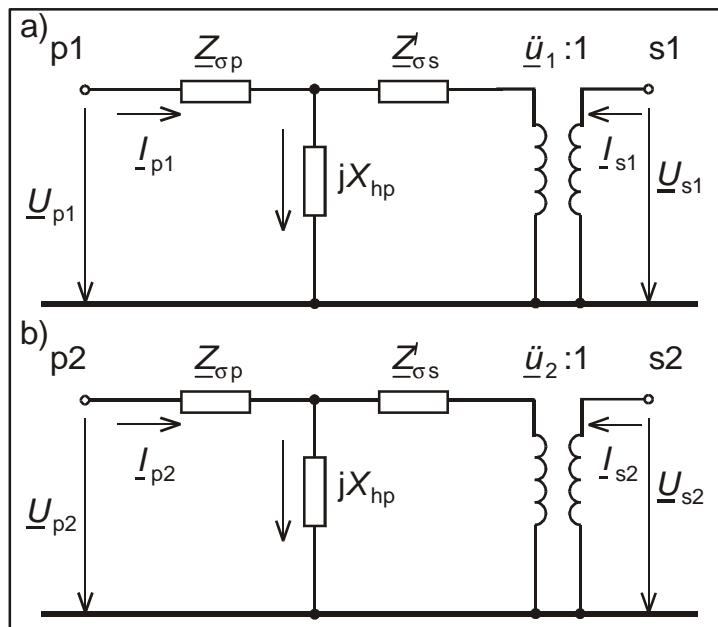


Bild 4.9: Allgemeine Ersatzschaltungen des Zweiwicklungstransformators mit der Schaltgruppe Yd5
 a) Mitsystem b) Gegensystem

4.4 Ersatzschaltungen der Schaltgruppe Yy0 mit Ausgleichwicklung

Diese Schaltung soll als Beispiel für die Ersatzschaltungen der Dreiwicklungstransformatoren dienen. Die Ausgleichwicklung oder Tertiärwicklung ist eine kurzgeschlossene Dreieckswicklung. Mit der Kenntnis der Schaltungsbedingungen für die Stern- und Dreieckswicklung aus den Abschnitten 4.2 und 4.3 können wir ausgehend von der Ersatzschaltung der Wicklungsgrößen entsprechend Bild 4.2 sofort die im Bild 4.10 gezeichneten Ersatzschaltungen angeben. Die Ausgleichwicklung ist im Mit- und Gegensystem stromlos, und der Zweig mit $\underline{Z}'_{\sigma t}$ kann in diesen Ersatzschaltungen auch weggelassen werden. Im Nullsystem ist die Ausgleichwicklung intern kurzgeschlossen und kann bei einer Sternpunktbelastung eine Gegendurchflutung aufbringen, so daß die Sternpunktbelastung zulässig ist. Die tertiärseitige Eingangs-

impedanz des Nullsystems ist wegen der Unterbrechung zwischen Wicklung und Klemme unendlich groß.

Die der Primär- und Sekundärseite, so wie die Durchgangsimpedanz von Primär- und Sekundärseite im Nullsystem hängen von der Sternpunkterdung ab. In Bild 4.10 ist der primärseitige Sternpunkt über Z_{Mp} und der sekundärseitige starr geerdet.

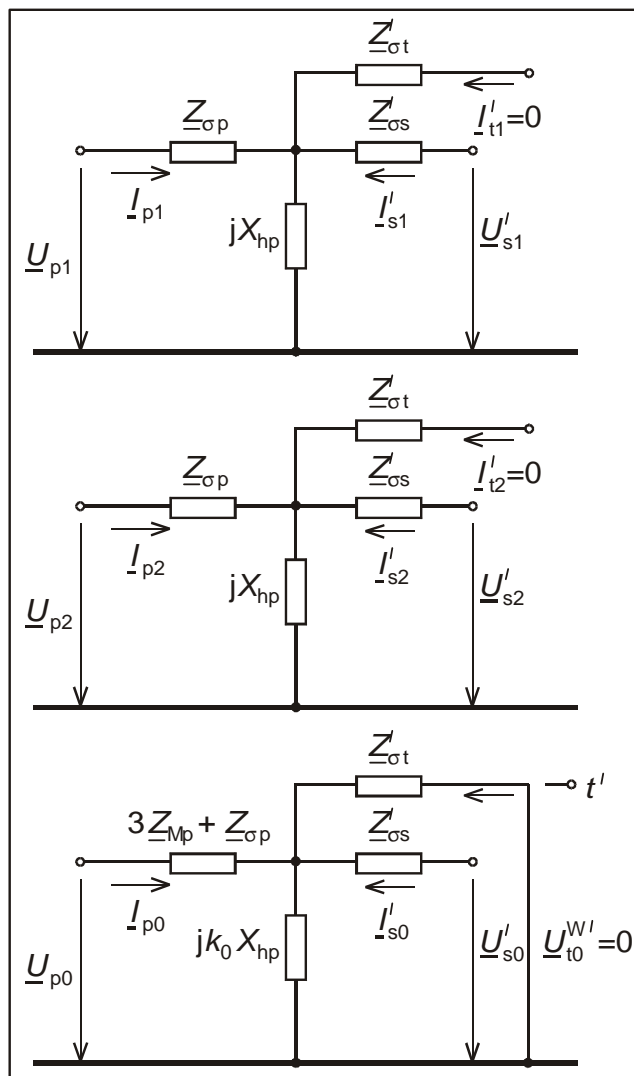


Bild 4.10: Ersatzschaltungen der Symmetrischen Komponenten des Zweiwicklungstransformators mit der Schaltgruppe Yy0 und Ausgleichwicklung

Ist ein Sternpunkt nicht geerdet, so ist die Nullimpedanz unendlich groß. Die Eingangsimpedanz der Primärseite bei Sternpunkterdung nur auf der Primärseite wird:

$$Z_{p0} = Z_{\sigma p} + 3Z_{Mp} + jk_0 X_{hp} \parallel Z'_{\sigma t} = Z_{\sigma p} + 3Z_{Mp} + \frac{jk_0 X_{hp} Z'_{\sigma t}}{Z'_{\sigma t} + jk_0 X_{hp}}$$

Entsprechend gilt für die Eingangsimpedanz der Sekundärseite bei Erdung nur auf der Sekundärseite:

$$Z_{s0}' = Z_{\sigma s} + 3Z_{Ms} + jk_0 X_{hs} \parallel Z'_{\sigma t} = Z_{\sigma s} + 3Z_{Ms} + \frac{jk_0 X_{hs} Z'_{\sigma t}}{Z'_{\sigma t} + jk_0 X_{hs}}$$

Für $k_0 = 1$ (Fünfschenkeltransformator und Drehstrombank) wird daraus näherungsweise:

$$\underline{Z}_{p0} = \underline{Z}_{op} + \underline{Z}'_{ot} + 3\underline{Z}_{Mp} = \underline{Z}_{pt} + 3\underline{Z}_{Mp}$$

$$\underline{Z}'_{s0} = \underline{Z}'_{os} + \underline{Z}'_{ot} + 3\underline{Z}'_{Ms} = \underline{Z}'_{st} + 3\underline{Z}'_{Ms}$$

Beim Dreischenkeltransformator ergibt die Parallelschaltung von $jk_0 X_{hp}$ mit \underline{Z}'_{ot} bei Vernachlässigung von R'_t unter der Annahme $X'_{ot} = X_{pt} / 2$:

$$\frac{k_0 X_{hp} \frac{1}{2} X_{pt}}{k_0 X_{hp} + \frac{1}{2} X_{pt}} = \frac{k_0 X_{hp} X_{pt}}{2k_0 X_{hp} + X_{pt}} \approx \frac{1}{2} X_{pt}$$

4.5 Ersatzschaltungen der Schaltgruppe Yz5*

Die Schaltgruppe Yz5 ist wegen der Aufteilung der Wicklungsstränge der Zickzack-schaltung auf der Sekundärseite auf je zwei Wicklungsstränge zunächst wie ein Dreiwicklungstransformator zu behandeln.

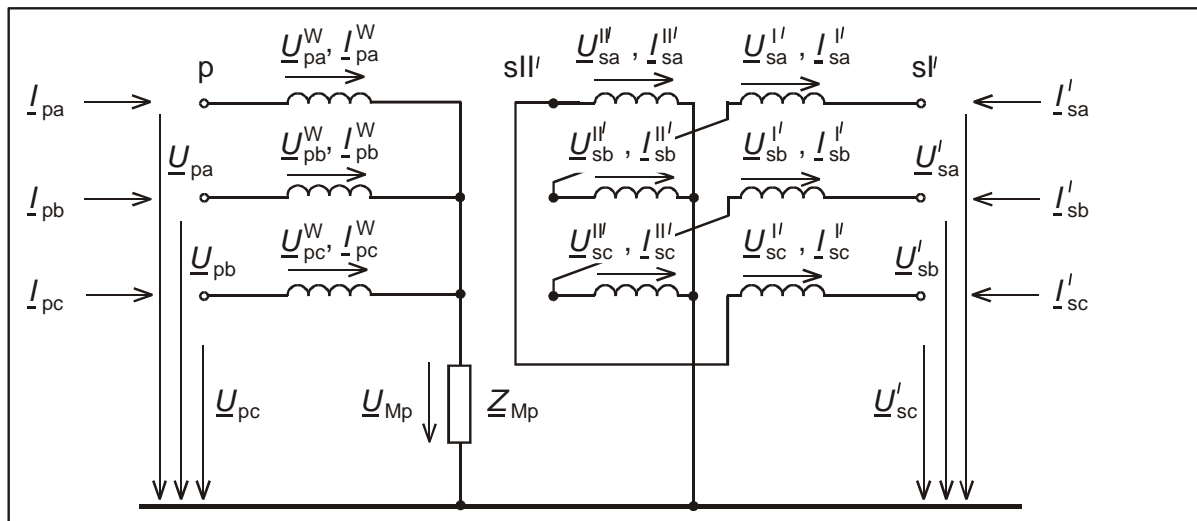


Bild 4.11: Schaltung der Schaltgruppe Yz5 mit Zählpfeilen

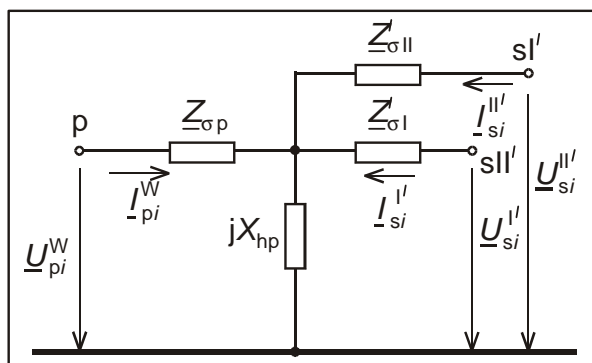


Bild 4.12: Wicklungsersatzschaltung für die Symmetrischen Komponenten ($i = 1, 2, 0$) der Schaltgruppe Yz5

Für die Wicklungsgrößen ergibt sich mit den Bezeichnungen aus Bild 4.11 in Analogie zu Bild 4.2 die in Bild 4.12 dargestellte Ersatzschaltung für die Symmetrischen Komponenten. Ihre Vervollständigung bis zu den Klemmengrößen auf der Primärsei-

te ist nach der Behandlung der Schaltgruppen Yy0 und Yd5 klar. Auf der Sekundärseite gilt nach Abschnitt 3.3:

$$\underline{U}'_{s1} = -\underline{U}'_{s1} + \underline{a}^2 \underline{U}''_{s1} \quad \underline{I}'_{s1} = -\underline{I}'_{s1} \quad \underline{I}''_{s1} = \underline{a}' \underline{I}'_{s1} \quad (4.20)$$

$$\underline{U}'_{s2} = -\underline{U}'_{s2} + \underline{a} \underline{U}''_{s2} \quad \underline{I}'_{s2} = -\underline{I}'_{s2} \quad \underline{I}''_{s2} = \underline{a} \underline{I}'_{s2} \quad (4.21)$$

$$\underline{U}'_{s0} = -\underline{U}'_{s0} + \underline{U}''_{s0} \quad \underline{I}'_{s0} = -\underline{I}'_{s0} \quad \underline{I}''_{s0} = \underline{I}'_{s0} \quad (4.22)$$

Wir führen wieder komplexe Übertrager ein und erhalten so die Ersatzschaltungen in Bild 4.13:

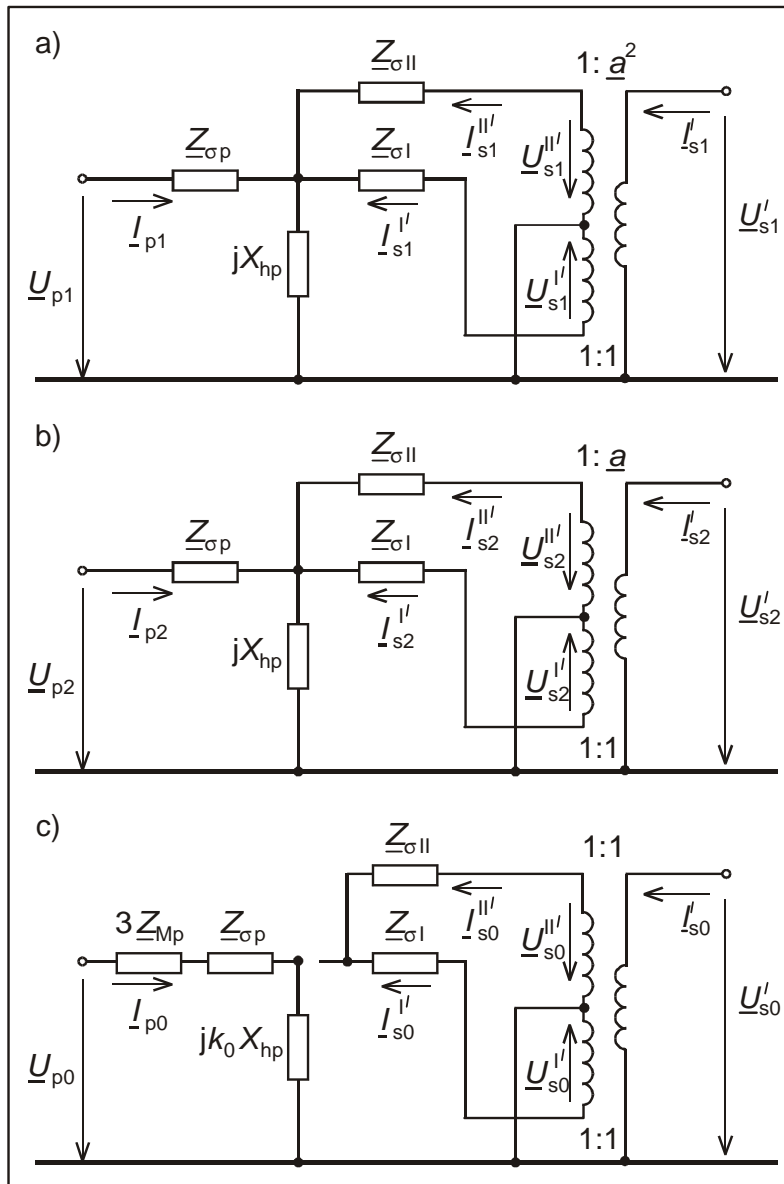


Bild 4.13: Ersatzschaltung der Symmetrischen Komponenten der Schaltgruppe Yz5
 a) Mitsystem b) Gegensystem c) Nullsystem mit Unterbrechung

Unter Benutzung der für jede Komponente gültigen Beziehung (s. Bild 4.12):

$$\underline{U}'_{si} = \underline{U}_{hpi} + \underline{Z}'_{\sigma i} \underline{I}'_{si}$$

$$\underline{U}''_{si} = \underline{U}_{hpi} + \underline{Z}''_{\sigma i} \underline{I}'_{si}$$

formen wir die Gln. (4.20) bis (4.22) noch wie folgt um:

$$\underline{U}'_{s1} = -\underline{U}'_{s1} + \underline{a}^2 \underline{U}''_{s1} = -\underline{U}_{hp1} + \underline{a}^2 \underline{U}_{hp1} - \underline{Z}'_{\sigma l} \underline{I}'_{s1} + \underline{a}^2 \underline{Z}''_{\sigma ll} \underline{I}''_{s1} = \underline{m}_5^* \underline{U}_{hp1} + (\underline{Z}'_{\sigma l} + \underline{Z}''_{\sigma ll}) \underline{I}'_{s1}$$

Mit der der Gl. (3.22) entsprechenden Beziehung:

$$\underline{I}'_{s1} = \frac{1}{\underline{a} - 1} (\underline{I}'_{s1} + \underline{I}''_{s1}) = \frac{1}{\underline{m}_5} \underline{I}^{W'}_{s1} \quad (4.23)$$

folgt weiter:

$$\underline{U}'_{s1} = \underline{m}_5^* \underline{U}_{hp1} + \frac{\underline{Z}'_{\sigma l} + \underline{Z}''_{\sigma ll}}{\underline{m}_5} \underline{I}^{W'}_{s1} = \underline{m}_5^* (\underline{U}_{hp1} + \frac{\underline{Z}'_{\sigma l} + \underline{Z}''_{\sigma ll}}{\underline{m}_5^* \underline{m}_5} \underline{I}^{W'}_{s1})$$

und mit $\underline{m}_5^* \underline{m}_5 = 3$ sowie:

$$\frac{1}{3} (\underline{Z}'_{\sigma l} + \underline{Z}''_{\sigma ll}) = \underline{Z}'_{\sigma s}$$

$$\underline{U}'_{s1} = \underline{m}_5^* (\underline{U}_{hp1} + \underline{Z}'_{\sigma s} \underline{I}^{W'}_{s1}) = \underline{m}_5^* \underline{U}^{W'}_{s1} \quad (4.24)$$

Ebenso erhalten wir für das Gegensystem:

$$\underline{I}''_{s2} = \frac{1}{\underline{a}^2 - 1} (\underline{I}'_{s2} + \underline{I}''_{s2}) = \frac{1}{\underline{m}_5} \underline{I}^{W'}_{s2} \quad (4.25)$$

$$\underline{U}'_{s2} = \underline{m}_5 (\underline{U}_{hp2} + \underline{Z}'_{\sigma s} \underline{I}^{W'}_{s2}) = \underline{m}_5 \underline{U}^{W'}_{s2} \quad (4.26)$$

und für das Nullsystem:

$$\underline{U}'_{s0} = 3 \underline{Z}'_{\sigma s} \underline{I}'_{s0} \quad (4.27)$$

Mit $\underline{U}^{W'}_{s1}, \underline{U}^{W'}_{s2}, \underline{I}^{W'}_{s1}, \underline{I}^{W'}_{s2}$ und $\underline{Z}'_{\sigma s}$ wurden fiktive Wicklungsgrößen für die Sekundärseite eingeführt, mit denen sich die Zweiwicklungs-Ersatzschaltungen in Bild 4.14 angeben lassen. Auf der rechten Seite der Ersatzschaltungen sind noch zusätzliche Übertrager für das Wicklungs-Übersetzungsverhältnis $n_{ps} = 2w_p / w_s$ hinzugefügt worden. Der Faktor 2 rührt daher, daß die Zickzackwicklung auf zwei Stränge, die jeweils die Windungszahl $w_s / 2$ haben, aufgeteilt ist. Im Mit- und Gegensystem können die Übertrager wieder zusammengefaßt werden, wodurch die Ersatzschaltungen schließlich die für den Zweiwickler allgemeine Form aus Bild 4.9 erhält. Das Übersetzungsverhältnis für das Mitsystem wird:

$$\underline{\dot{u}}_1 = \frac{1}{\underline{m}_5^*} \cdot 2 \frac{w_p}{w_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{w_p}{w_s} \angle 150^\circ = \underline{\dot{u}} \angle 150^\circ \quad (4.28)$$

Das Übersetzungsverhältnis des Gegensystems ist wieder konjugiert komplex zu dem des Mitsystems, also $\underline{\dot{u}}_2 = \underline{\dot{u}}_1^*$.

Im Mit- und Gegensystem ist auf der Sekundärseite die Summe $\underline{Z}_{\sigma I} + \underline{Z}_{\sigma II}$ wirksam, was sich durch Transformation von $\underline{Z}'_{\sigma s}$ auf die Originalspannungsebene der Sekundärseite bestätigen muß:

$$\underline{Z}_{\sigma s} = \frac{\underline{Z}'_{\sigma s}}{\underline{\dot{u}}_1 \underline{\dot{u}}_1^*} = \frac{1}{\underline{\dot{u}}^2} \frac{\underline{Z}'_{\sigma I} + \underline{Z}'_{\sigma II}}{3} = 3 \left(\frac{w_s}{2w_p} \right)^2 \left(\frac{2w_p}{w_s} \right)^2 \frac{\underline{Z}_{\sigma I} + \underline{Z}_{\sigma II}}{3} = \underline{Z}_{\sigma I} + \underline{Z}_{\sigma II}$$

Im Nullsystem ist auf der Sekundärseite die Eingangs-Impedanz

$$\underline{Z}_{\sigma s0} = \frac{1}{\underline{\dot{u}}_0^2} 3 \underline{Z}'_{\sigma s} = \left(\frac{w_s}{2w_p} \right)^2 3 \underline{Z}'_{\sigma s} = \left(\frac{w_s}{2w_p} \right)^2 3 \left(\frac{2w_p}{w_s} \right)^2 \frac{\underline{Z}_{\sigma I} + \underline{Z}_{\sigma II}}{3} = \underline{Z}_{\sigma I} + \underline{Z}_{\sigma II}$$

wirksam.

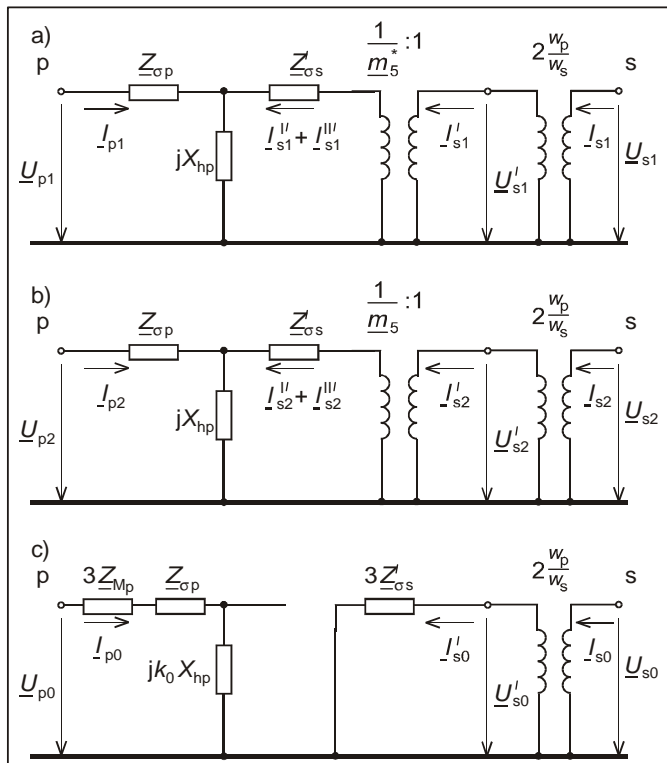


Bild 4.14: Ersatzschaltung der Symmetrischen Komponenten des Zweiwicklungs-
transformators mit der Schaltgruppe Yz5

a) Mitsystem b) Gegensystem c) Nullsystem

Ein Nullsystem auf der Sekundärseite trägt nicht zur Magnetisierung bei. Der Transformator ist damit auf der Zickzackseite voll sternpunktbelastbar. Die Durchgangsimpedanz von der Primär- zur Sekundärseite im Nullsystem ist unendlich groß.

Auf der Primärseite hängt die Eingangsimpedanz von der Sternpunkterdung ab, wobei eine Sternpunktbelastung je nach Kernbauart nicht zulässig ist oder nur gering sein darf.

4.6 Einsatz der Schaltgruppen

Für die in Kapitel 1 (s. Bild 1.5) genannten Haupt-Einsatzgebiete der Transformatoren haben sich folgende Schaltgruppen als zweckmäßig erwiesen:

Netzkoppeltransformatoren:	Yy0 mit Δ -Ausgleichswicklung
Blocktransformatoren:	Yd5, (Yd11)
Blockeigenbedarfstransformatoren	Yy0, Yd5, (Dd0)
Verteilungstransformatoren:	Yy0, Yd5
Ortsnetztransformatoren:	Dy5 und Yz5

380/220- oder 380/110-kV-*Netzkoppeltransformatoren* haben auf jeder Seite eine relativ hohe Bemessungsspannung, für die die Sternschaltung der Wicklungen wirtschaftlicher ist als die Dreieckswicklung. Außerdem muß auf beiden Seiten der Sternpunkt zugänglich sein, da die Hochspannungsnetze i.a. niederohmig geerdet werden. Um die Sternpunkte auch voll belasten zu können, wird eine zusätzliche Ausgleichswicklung in Dreieckschaltung vorgesehen. *Blocktransformatoren* haben auf der Generatorseite eine relativ geringe Bemessungsspannung, so daß für die Unterspannungsseite mit hohen Strömen die Dreieckschaltung günstiger ist. Ein Sternpunkt wird auf der Unterspannungsseite nicht benötigt, da die Generatoren generell nicht im Sternpunkt geerdet werden. Dagegen ist auf der Oberspannungsseite wieder ein Sternpunkt zur Erdung des Hochspannungsnetzes erwünscht. Dem kommt wie beim Netzkoppeltransformator entgegen, daß die Sternschaltung auf der Oberseite wirtschaftlicher ist. *Blockeigenbedarfstransformatoren* spannen lediglich in der Mittelspannungsebene um und haben somit sowohl auf der Oberspannungs- als auch auf der Unterspannungsseite relativ kleine Bemessungsspannungen. Es kommen sowohl die Schaltgruppen Yy0, Yd5 und bisweilen auch Dd0 in Frage, wobei die Dreieckswicklung bei großer Eigenbedarfsleistung bevorzugt wird. Die relativ kleinen Eigenbedarfsnetze werden gewöhnlich ohne Sternpunkterdung betrieben, so daß ein Sternpunkt nicht benötigt wird.

Verteilungstransformatoren (HS-MS) werden normalerweise mit der Schaltgruppe Yy0 ausgeführt, um den wirtschaftlichen Vorteil der Sternschaltung zu nutzen. Eine Ausgleichswicklung lohnt sich meist nicht, da zum einen kaum Unsymmetriezustände im Normalbetrieb auftreten und zum anderen die Sternpunkte dieser Transformatoren gewöhnlich nicht oder wenn überhaupt, dann nur auf der Unterspannungsseite über Erdschluß-Kompensationsspulen geerdet werden. Der Anschluß der Erdschluß-Kompensationsspulen für das 110-kV-Netz erfolgt an den unterspannungsseitigen Sternpunkten der Netztransformatoren (s. Skript Sternpunkterdung). Ist dennoch eine Erdung der oberspannungsseitigen Sternpunkte vorgesehen, so ist anstelle der Schaltgruppe Yy0 die Schaltgruppe Yd5 einzusetzen, bei der die Dreieckswicklung auf der Unterspannungsseite für eine volle Sternpunktbelastbarkeit auf der Oberspannungsseite sorgt.

An *Ortsnetztransformatoren* (MS-NS) werden auf der Niederspannungsseite Abnehmer einphasig angeschlossen. Sie müssen also einen zugängigen Sternpunkt haben, und es ist mit unsymmetrischer Belastung im Normalbetrieb zu rechnen. Somit bieten sich die Schaltgruppen Dy5 und Yz5 an.

4.7 Zusammenfassung - Allgemeine Ersatzschaltbilder der Zweiwicklungstransformatoren

Wir haben Ersatzschaltungen der Transformatoren mit und ohne Übertrager kennengelernt. Die Mitsystem-Ersatzschaltungen mit Übertrager bestehen gewöhnlich aus einer T-Ersatzschaltung der auf eine Spannungsebene umgerechneten Schaltelemente und einem Übertrager mit dem Übersetzungsverhältnis $\underline{\dot{u}}_1$ (Bild 4.15).

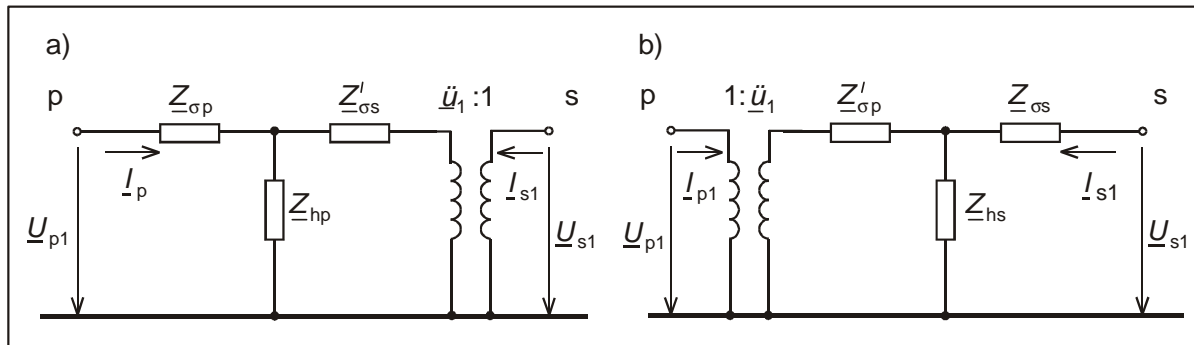


Bild 4.15: Mitsystem-Ersatzschaltungen des Zweiwicklungs-Transformators mit Übertrager
 a) mit auf die Primärseite umgerechneten Parametern
 b) mit auf die Sekundärseite umgerechneten Parametern

Für die 4 Vorzugsschaltgruppen ist das Übersetzungsverhältnis $\underline{\dot{u}}_1$ in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4.1: Kennzeichen der Vorzugsschaltgruppen

SG	Anwendung	$\underline{\dot{u}}_1$	OS	US
Yy0	Netzkupplentransformatoren Verteilungstransformatoren	$\frac{w_p}{w_s}$		
Yd5	Blocktransformatoren Verteilungstransformatoren	$\sqrt{3} \frac{w_p}{w_s} e^{j150^\circ}$		
Dy5	Ortsnetztransformatoren	$\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{w_p}{w_s} e^{j150^\circ}$		
Yz5	Ortsnetztransformatoren	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{w_p}{w_s} e^{j150^\circ}$		

Die Ersatzschaltungen für das Gegensystem unterscheiden sich von denen des Mitsystems nur durch den konjugiert komplexen Wert des Übersetzungsverhältnisses $\underline{\dot{u}}_2 = \underline{\dot{u}}_1^*$.

Die Ersatzschaltungen für das Mitsystem ohne Übertrager werden zweckmäßigerweise in Π -Form angegeben, wobei die Querglieder im Gegensatz zur T-Schaltung mit Übertrager auf keinen Fall vernachlässigt werden können (Bild 4.16).

Die entsprechenden Gegensystem-Ersatzschaltungen enthalten wieder $\underline{\dot{u}}_2 = \underline{\dot{u}}_1^*$ anstelle von $\underline{\dot{u}}_1$ an den Ausdrücken der Schaltungselemente.

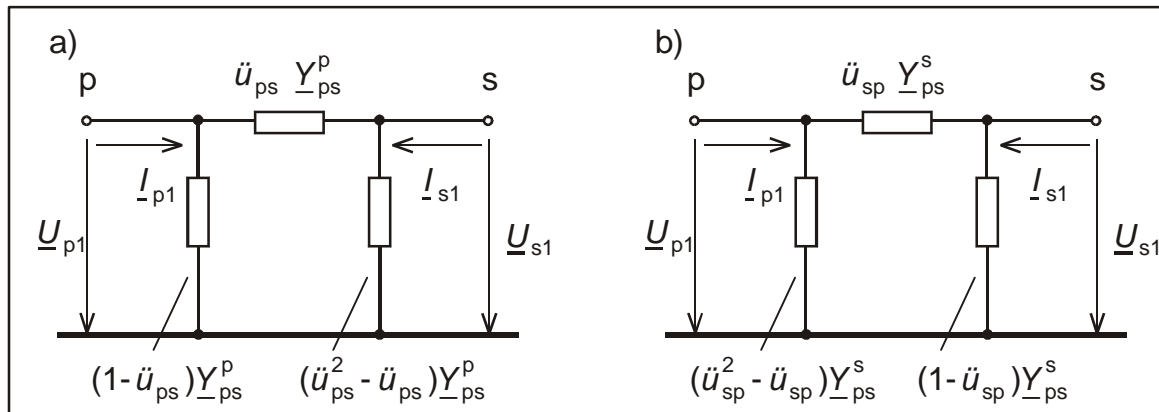


Bild 4.16: Mitsystem-Ersatzschaltungen des Zweiwicklungs-Transformators ohne Übertrager (Magnetisierungsstrom vernachlässigt)

- a) mit für die Primärseite bereitgestellten Parametern
- b) mit für die Sekundärseite bereitgestellten Parametern

Die Nullsystem-Ersatzschaltungen hängen ab von:

- der Art der Schaltgruppe
- der Art der Sternpunktterdung
- der Kernbauart (freier oder erzwungener magnetischer Rückschluß).

In Tabelle 4.2 sind die Nullsystem-Ersatzschaltungen der Vorzugsschaltgruppen mit auf die Primärseite umgerechneten Sekundärgrößen in Abhängigkeit von der Art der Sternpunktterdung und der Kernbauart zusammengestellt. Mit Z_{p00} und Z'_{s00} sind dabei auch die primär- und sekundärseitigen Eingangsimpedanzen und mit Z_{ps0} die Durchgangsimpedanz angegeben.

Tabelle 4.2: Kennzeichen der Vorzugsschaltgruppen

SG	OS	US		Z_{p00}	Z'_{s00}	Z_{ps0}
Yy0			∞	∞	∞	
			$3Z_{M_p} + Z_{cp} + jk_0 X_{hp}$	∞	∞	
			∞	∞	$3Z'_{M_s} + Z'_{cs} + jk_0 X_{hp}$	
Yd5			∞	∞	∞	
			$3Z_{M_p} + Z_{cp} + Z'_{cs} \parallel jk_0 X_{hp}$	∞	∞	

Tabelle 4.2 Fortsetzung

Dy5			∞	∞	∞
			∞	∞	$3Z'_{Ms} + Z'_{\sigma s} + Z_{cp} \parallel jk_0 X_{hp}$
Yz5			∞	$3Z'_{\sigma s}$	∞
			$3Z_{Mp} + Z_{cp} + jk_0 X_{hp}$	∞	∞

5 Spartransformatoren

Das Prinzip des Spar- oder im Ausland auch als *Autotransformator* bezeichneten Transformators ist aus Bild 5.1 ersichtlich.

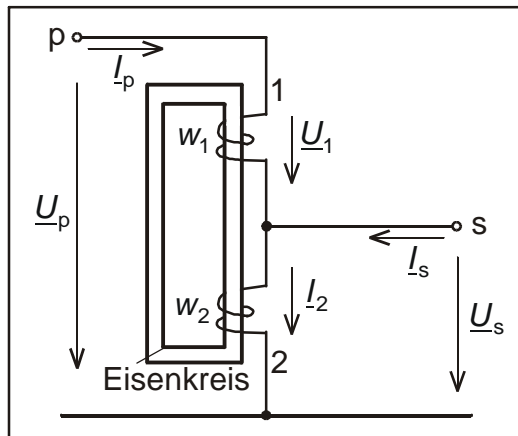


Bild 5.1: Prinzipschaltung des Einphasen-Spartransformators

Der Primär- und Sekundärseite ist ein Teil der Wicklung, die sog. *Stammwicklung* mit der Windungszahl w_2 , gemeinsam. Während beim Volltransformator die gesamte Leistung von Wicklung zu Wicklung auf dem Eisenweg übertragen wird, wird beim Spartransformator ein Teil der Leistung zwischen den Wicklungen 1 und 2 auf dem Eisenweg und der andere Teil auf direktem Weg übertragen.

Die Baugröße eines Transformators wird durch die auf dem Eisenweg übertragene Scheinleistung, die sog. *Typenleistung*, bestimmt. Beim Zweiwicklungs-Volltransformator ist somit die Typenleistung stets gleich der Durchgangsleistung, die wiederum der *Bemessungsleistung* gleich ist. Für Mehrwicklungstransformatoren berechnet man die Typenleistung als Summe der halben Bemessungsleistungen der Wicklungen. So hat beispielsweise ein 100/100/33-MVA-Transformator eine Typenleistung von 116,5 MVA und Durchgangsleistungen von 100 bzw. 33 MVA.

Die Durchgangsleistung des Spartransformators ergibt sich wie beim Volltransformator aus:

$$S_D = S_{rT} = \sqrt{3} U_{rT}^p I_{rT}^p = \sqrt{3} U_{rT}^s I_{rT}^s \quad (5.1)$$

Die Typenleistung, also der *magnetisch* übertragene Leistungsanteil, beträgt demgegenüber:

$$S_T = \sqrt{3} U_{1r} I_{rT}^p = \sqrt{3} U_{rT}^s I_{2r} \quad (5.2)$$

Mit $U_{1r} = U_{rT}^p - U_{rT}^s$ folgt für das Verhältnis der Leistungen:

$$\boxed{\frac{S_T}{S_D} = \frac{\sqrt{3} (U_{rT}^p - U_{rT}^s) I_{rT}^p}{\sqrt{3} U_{rT}^p I_{rT}^p} = 1 - \frac{U_{rT}^s}{U_{rT}^p}} \quad (5.3)$$

Um ein kleines, d.h. günstiges Verhältnis von S_T zu S_D zu erhalten, darf sich demnach U_{rT}^s nicht zu stark von U_{rT}^p unterscheiden. Es lohnen sich Spartransformatoren also nur für Spannungsverhältnisse:

$$\frac{U_{rT}^p}{U_{rT}^s} \leq 2$$

Man setzt im Netzbetrieb Spartransformatoren in Form von Drehstrombänken mit Dreiecksausgleichswicklung zur Kupplung der 220- und 380-kV-Netze ein, wo die Bedingung für das wirtschaftliche Spannungsverhältnis erfüllt ist, und außerdem die galvanische Kopplung der Netze nicht stört, da beide Netze niederohmig sternpunktgeerdet werden. Die *Schaltgruppe* der Spartransformatoren ist stets Yy0.

Zusammengefaßt bestehen die *Vorteile* des Spartransformators in der bei gleicher Durchgangsleistung kleineren Baugröße (es sind größere Einheitsleistungen bahntransportfähig) und in einem besseren Wirkungsgrad (mit S_T sinken auch die Verluste, bezogen auf die Durchgangsleistung), während die für Spartransformatoren typischen, kleineren Kurzschlußspannungen ($u_k = 7 \dots 10 \%$) u. U. nachteilig sein können (höhere Kurzschlußströme) und die galvanische Kopplung der Netze in Kauf genommen werden muß. Bei Unterbrechung der Wicklung 2 liegt die volle Primärspannung an der Sekundärseite an, weshalb man auch mit Rücksicht auf diesen Fall $U_{rT}^p / U_{rT}^s \leq 2$ einhalten sollte.

6 Regeltransformatoren

Zur Beeinflussung der Spannungsverhältnisse und des Leistungsflusses im Netz werden die Block- und Netzkuppeltransformatoren als Regeltransformatoren ausgeführt. An Regeltransformatoren kann die Spannung nach Betrag und Phasenlage unter Last mit Hilfe des sog. *Stufenschalters* eingestellt werden. In der Ersatzschaltung ändert sich bei Regeltransformatoren das (komplexe) Übersetzungsverhältnis. Praktisch wird die Regelung so realisiert, daß - meist auf der Oberspannungsseite - eine *Zusatzspannung* aufgebracht wird, die zur Spannung der Haupt- oder Stammwicklung addiert oder von ihr abgezogen wird. Je nach der Phasenlage der Zusatzspannung teilt man die Regeltransformatoren in *Längs-* (gleiche Phasenlage), *Quer-* (90°-Phasenunterschied) und *Schrägregler* (60° oder 30°-Phasenlage) ein (Bild 6.1).

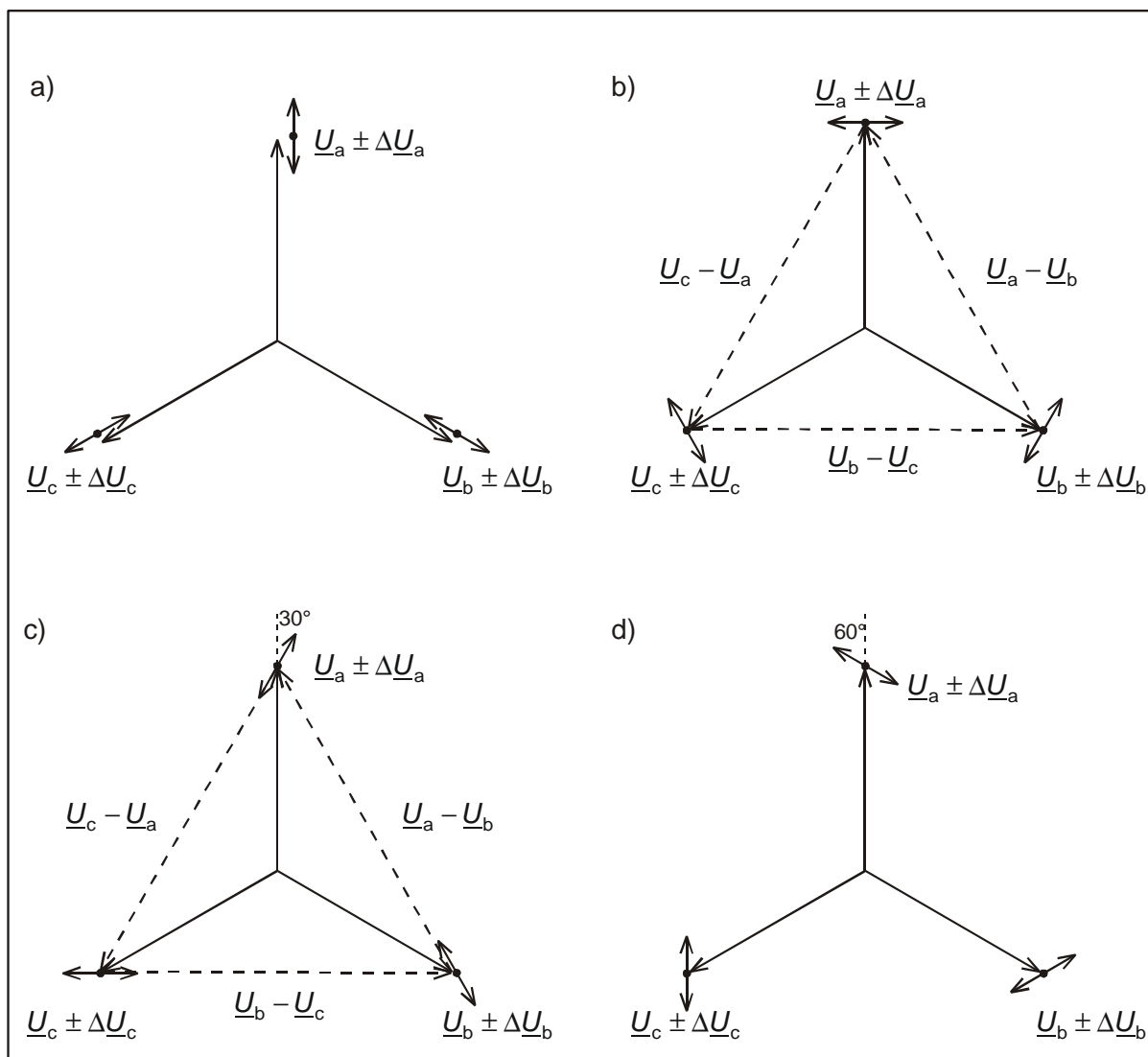


Bild 6.1: Phasenlagen der Zusatzspannungen bei den verschiedenen Regelprinzipien

- a) Längsregelung
- b) Querregelung
- c) 30°-Schrägregelung
- d) 60°-Schrägregelung

Das Prinzip der Leistungsbeeinflussung durch die Transformatorregelung erklärt das Bild 6.2.

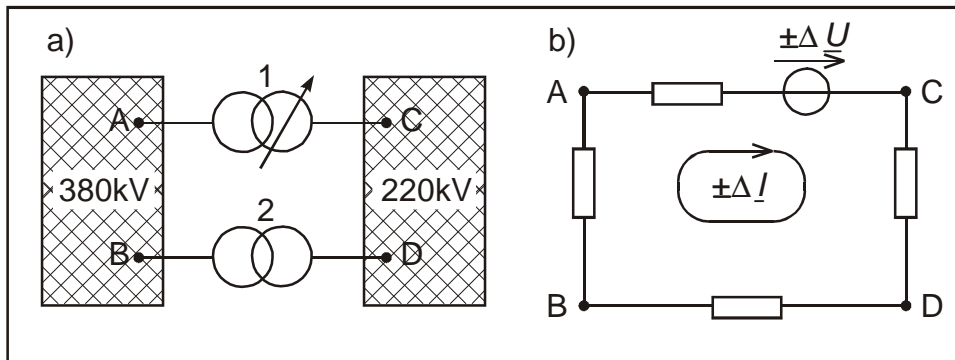


Bild 6.2: Prinzip der Leistungsregelung mit Transformatoren

- a) Anordnung
- b) Ersatzkreis

Die von Regeltransformator 1 aufgebrachte Zusatzspannung $\pm \Delta U$ bewirkt einen Ringstrom $\pm \Delta I$, der sich den ursprünglichen Strömen überlagert und damit die Leistungsflüsse sowohl in den beiden Netzen als auch zwischen den beiden Netzen beeinflusst.

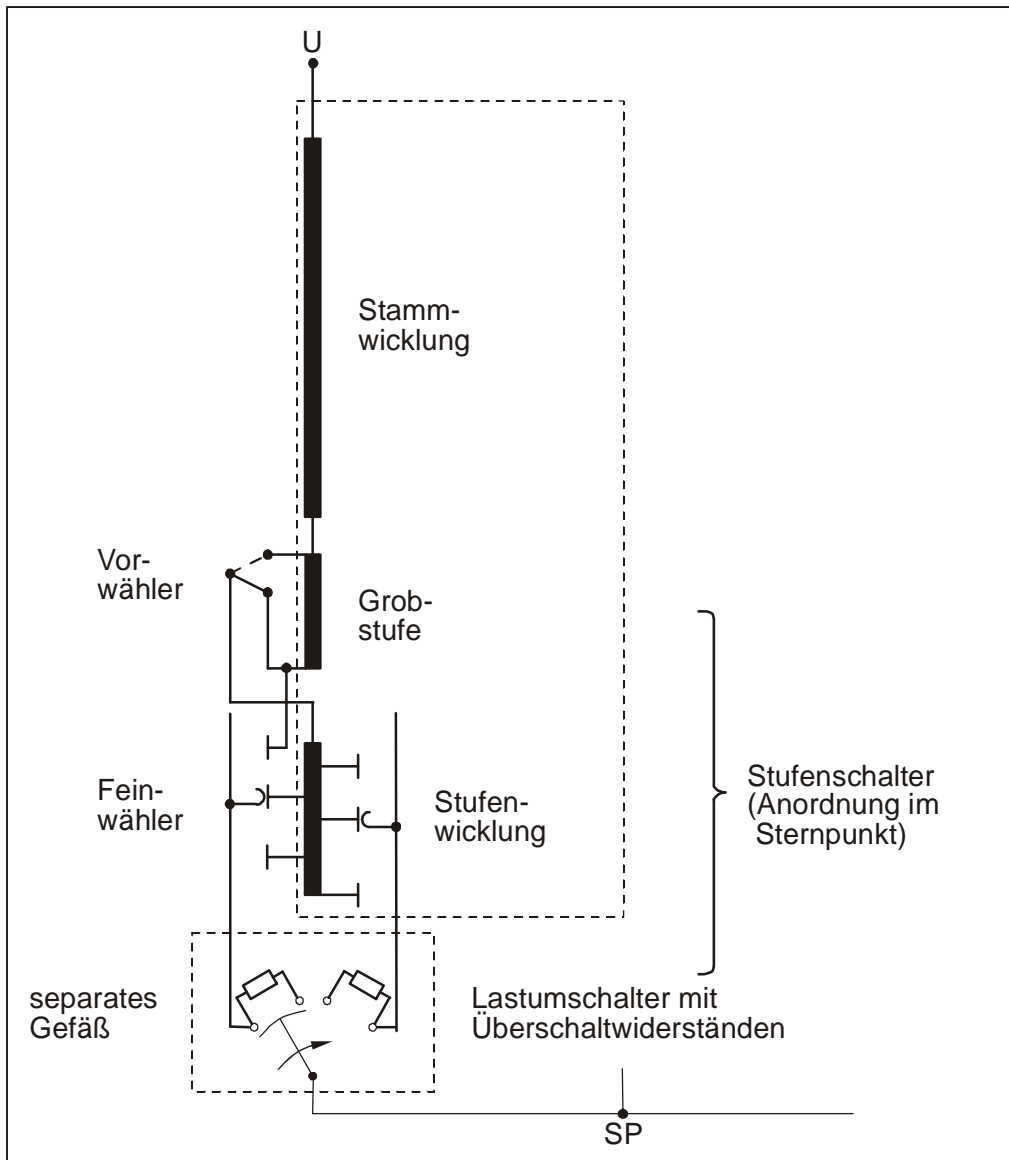


Bild 6.3: Längsregelung nach dem Grob-/Feinprinzip

Die Maschinen- oder Blocktransformatoren der großen Kraftwerkseinheiten sind gewöhnlich mit einer *Längsregelung* ausgerüstet. Die Schaltung geht aus Bild 6.3, in dem ein Strang der geregelten Oberspannungswicklung dargestellt ist, hervor. Die Zusatzspannung wird von der Zusatzwicklung aufgebracht, die aus einer *Grobstufe* und einer *Stufenwicklung* besteht und auf dem gleichen Schenkel wie die Stammwicklung (wegen der gewünschten gleichen bzw. entgegengesetzten Phasenlage) angeordnet ist. Die Grobstufe kann durch einen *Vorwähler* umgepolt werden, wodurch der Regelbereich in beide Richtungen geht. Über dem *Feinwähler* und *Lastumschalter* ist die Spannung im Bereich von $\pm 10 \dots 16 \%$ in $18 (\pm 9)$ bis $26 (\pm 13)$ Stufen und in Sonderfällen bis $\pm 22 \%$ verstellbar. Der Spannungsunterschied ΔU zwischen den einzelnen Stufen beträgt mit Rücksicht auf die Spannungsschwankungen bei der Umschaltung $1 \dots 1,5 \%$ von U_r . Für den unterbrechungsfreien Übergang auf eine nächste Stufe wird diese zunächst mit dem Feinwähler stromlos angewählt und danach der Lastumschalter, der mit einem Motor-Federantrieb arbeitet, betätigt. Während des Umschaltens wird die Wicklungsstufe zwischen dem alten und neuen Abgriff kurzzeitig kurzgeschlossen (Mittelstellung des Schalterkontaktes in Bild 6.3). Die *Überschaltwiderstände* begrenzen dabei den Kurzschlußstrom und die Schalterbeanspruchung.

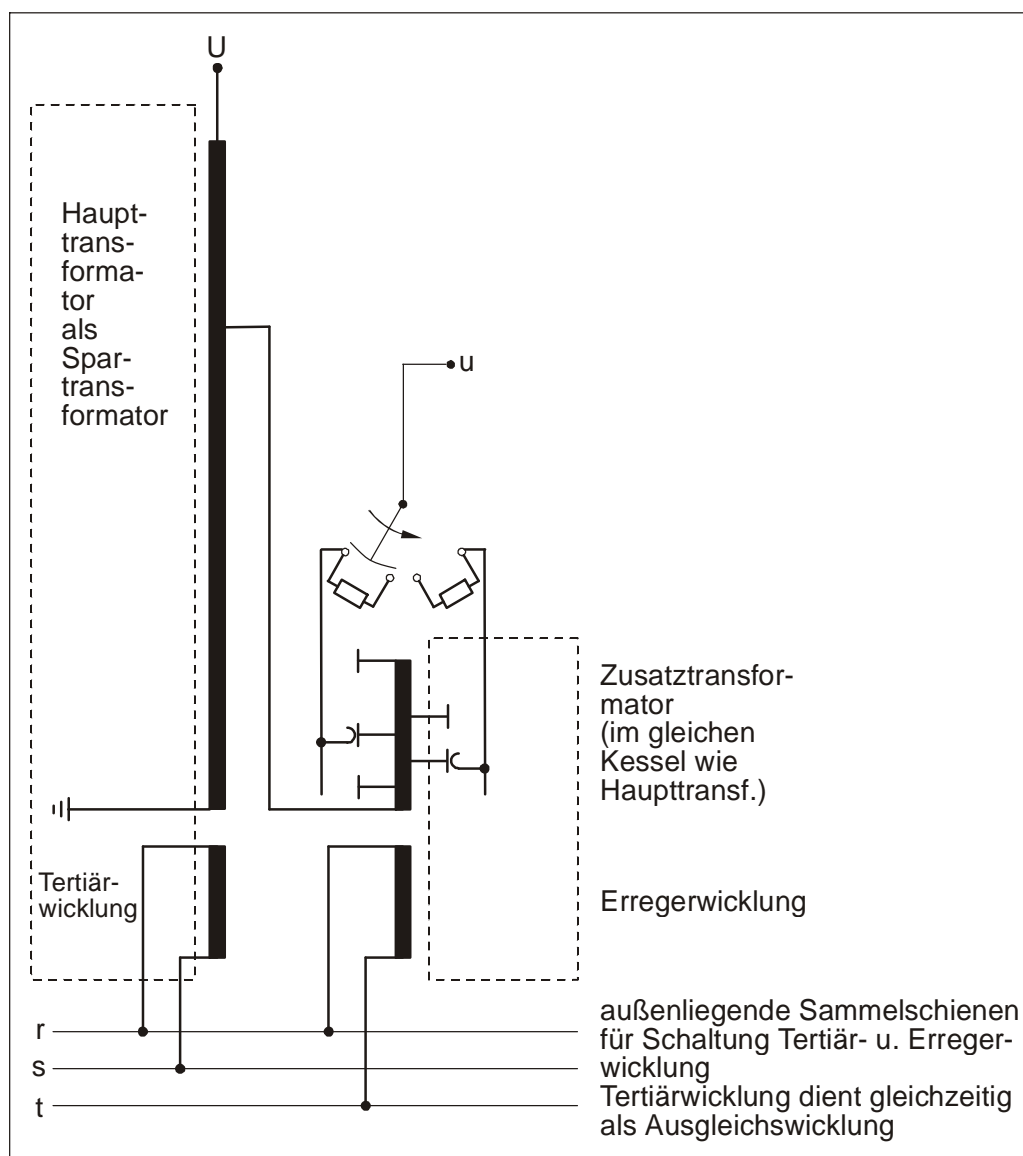


Bild 6.4: Spartransformator mit 30°-Schrägregelung

Der Lastumschalter ist mit den Überschaltwiderständen in einem separaten Gefäß im Kessel des Transformators untergebracht, während die stromlos betätigten Vorwähler im Transformator in die Nähe der Wicklungsanzapfungen gelegt werden können. Nach dem Erfinder bezeichnet man Stufenschalter, die nach dem hier beschriebenen Prinzip der Widerstandsschnellumschaltung funktionieren, auch als JANSEN-Stufenschalter.

Netzkuppeltransformatoren werden als Schrägregler ausgeführt. Das Bild 6.4 zeigt die Schaltung eines Stranges eines in Sparschaltung ausgeführten Schrägreglers mit Dreiecks-Ausgleichswicklung.

Die Anschlüsse der im Dreieck geschalteten Ausgleichswicklung (Tertiärwicklung) sind auf außenliegende Sammelschienen herausgeführt. Die Spannung für die Erregerwicklung des Zusatztransformators wird zwischen r und t abgegriffen, wodurch die gewünschte 30° -Phasenverschiebung der Zusatzspannung gegenüber der Spannung der Hauptwicklung wie in Bild 6.1c entsteht.

7 Transformatorparameter

7.1 Mit- und Gegensystemparameter der Zweiwicklungstransformatoren

In der Ersatzschaltung (Bild 4.15) kommen in den Längszweigen die Wirkwiderstände R_p , R'_s oder R'_p und R_s , die Streureaktanzen $X_{\sigma p}$, $X'_{\sigma s}$ oder $X'_{\sigma p}$ und $X_{\sigma s}$ sowie in den Querzweigen die Magnetisierungs- oder Hauptfeldreaktanz X_h und ein noch einzuführender Ersatzwiderstand R_{Fe} für die Eisenverluste vor.

Wie bei jedem anderen Betriebsmittel werden die Parameter der Längszweige im *Kurzschlußversuch* und die der Querzweige im *Leerlaufversuch* bestimmt. Je nachdem, ob die Mit- und Gegen- oder Nullsystemgrößen bestimmt werden sollen, wird dabei eine Einspeisung eines Mit-, Gegen-, oder Nullsystems vorgenommen. Das Bild 7.1 zeigt diese Schaltungen für den Kurzschlußversuch mit der Anordnung der Meßinstrumente in einem Strang. Zusätzlich zur Strom- und Spannungsmessung ist noch eine Wirkleistungsmessung oder Phasenwinkelbestimmung zwischen Strom- und Spannung erforderlich, um die gemessene Impedanz nach R und X zu erhalten. Die gemessene Wirkleistung entspricht den *Wicklungsverlusten*, die deshalb auch *Kurzschlußverluste* heißen (s. Abschnitt 8.2). Die Speisespannung wird von Null aus so weit erhöht, bis der *Bemessungsstrom* I_{rT} fließt.

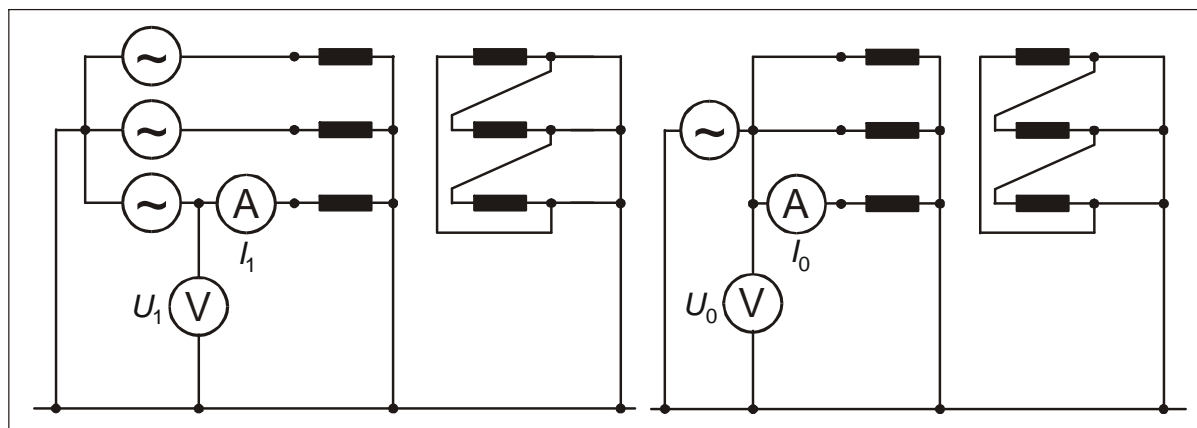


Bild 7.1: Kurzschlußversuch für die Schaltgruppe Yd5

- Bestimmung der Mitsystemgrößen
- Bestimmung der Nullsystemgrößen

Die Spannung, bei dem sich der Bemessungsstrom einstellt, ist die sog. *Kurzschlußspannung* U_k . Für Kurzschluß z.B. auf der Sekundärseite gilt nach Bild 2.4 mit $U'_s = 0$ und unter Vernachlässigung des Querzweiges (die Spannung bleibt im Kurzschlußversuch genügend klein) und $I_{-pk} = I_{pk} \angle 0^\circ$:

$$\underline{U}_{-pk} = (\underline{Z}_{\sigma p} + \underline{Z}'_{\sigma s}) I_{pk} = (\underline{Z}_{\sigma p} + \underline{Z}_{\sigma s}) I_{rT}^p = \underline{Z}_{ps}^p I_{rT}^p = \underline{Z}_T^p I_{rT}^p \quad (7.1)$$

Bezieht man nun die Kurzschlußspannung auf den Wert der primärseitigen Bemessungsspannungswert geteilt durch $\sqrt{3}$, so erhält man:

$$\frac{U_{pk}}{U_{rT}^p / \sqrt{3}} = u_k = z_T^p \frac{I_{rT}^p}{U_{rT}^p / \sqrt{3}} = z_T^p \frac{S_{rT}}{(U_{rT}^p)^2} = z_T \quad (7.2)$$

wobei S_{rT} die Bemessungsleistung ist.

Also ist die bezogene Kurzschlußspannung oder kurz die Kurzschlußspannung u_k gleich der bezogenen Impedanz z_T , wobei es gleichgültig ist, von welcher Seite (primär oder sekundär) man ausgegangen ist:

$$\underline{u}_k = \underline{z}_T = r_T + jx_T \quad (7.3)$$

Für die Beträge gilt:

$$u_k = z_T = \sqrt{r_T^2 + x_T^2}$$

Die (bezogene) Kurzschlußspannung u_k ist eine Leistungsschildangabe. Sie wird gewöhnlich in Prozent angegeben und liegt in der Größenordnung:

$$u_k = 4..20\%$$

wobei die kleinen Werte für kleine und die großen Werte für große Transformatoren gelten (hierzu Bild 7.2).

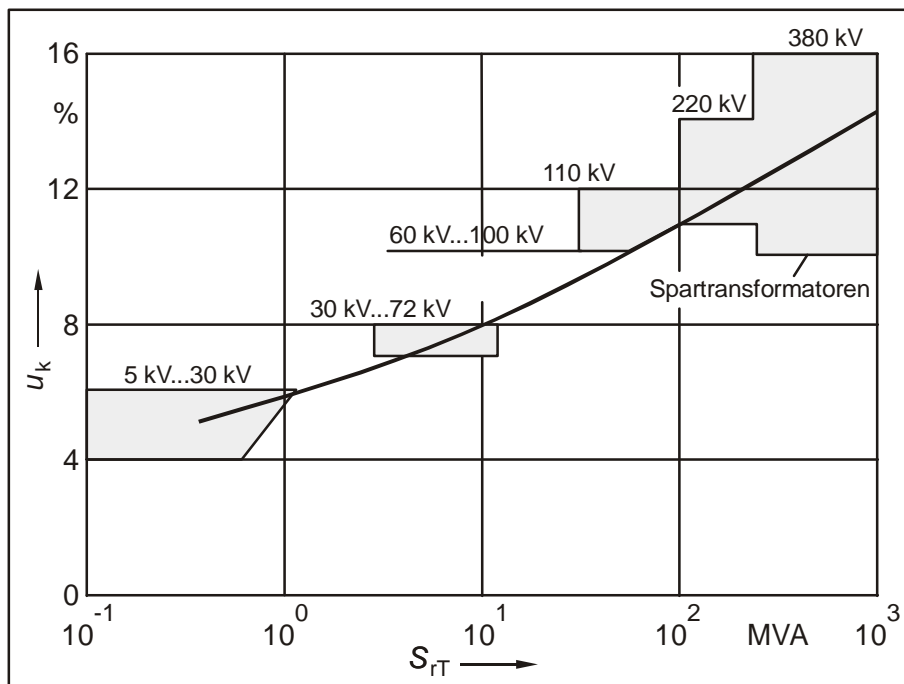


Bild 7.2: Kurzschlußspannung von Voll- und Spartransformatoren in Abhängigkeit von der Bemessungsleistung und Bemessungsspannung

Der Anstieg von u_k mit der Bemessungsleistung und damit mit der Baugröße des Transformators beruht auf der mit der Bemessungsleistung einhergehenden Steigerung der Bemessungsspannung, mit der die Isolationsabstände und damit die Streukanäle größer werden. Die Kurzschlußspannung von Spartransformatoren ist deutlich kleiner als die von Volltransformatoren gleicher Leistung.

Aus der beim Kurzschlußversuch umgesetzten Wirkleistung, den *Kurzschlußverlusten* (s. auch Kapitel 8):

$$P_{kr} = 3R_T I_{rT}^2 \quad (7.4)$$

erhält man den *Wirkwiderstand* wie folgt:

$$R_T = \frac{P_{kr}}{3I_{rT}^2} \quad (7.5)$$

Der *bezogene* Wirkwiderstand ist mit den auf die Bemessungsleistung bezogenen Kurzschlußverlusten identisch, denn es gilt:

$$r_T = R_T \frac{I_{rT}}{U_{rT} / \sqrt{3}} = R_T \frac{S_{rT}}{U_{rT}^2} = \frac{P_{kr}}{S_{rT}} \quad (7.6)$$

Er hat die Größenordnung:

$$r_T = 2..0,2\%$$

wobei die kleineren Werte für die größeren Transformatoren gelten (s. Bild 7.4). Transformatoren haben demnach ein Verhältnis R zu X von etwa (kleine Werte für große Transformatoren):

$$0,5 \leq R / X \leq 0,01$$

Aus der Kurzschlußspannung berechnen sich die Impedanzen für die Primär- und die Sekundärseite wie folgt:

$$\begin{aligned} Z_T^p &= \frac{z_T / \%}{100} \cdot \frac{U_{rT}^p}{\sqrt{3} I_{rT}^p} = \frac{z_T / \%}{100} \cdot \frac{(U_{rT}^p)^2}{S_{rT}} \\ Z_T^s &= \frac{z_T / \%}{100} \cdot \frac{U_{rT}^s}{\sqrt{3} I_{rT}^s} = \frac{z_T / \%}{100} \cdot \frac{(U_{rT}^s)^2}{S_{rT}} \end{aligned} \quad (7.7)$$

Mit R_T aus P_{kr} ergibt sich dann:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (7.8)$$

oder wenn nur das Verhältnis R zu X bekannt ist:

$$X_T = \frac{Z_T}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_T}{X_T}\right)^2}} \quad (7.9)$$

wobei bei großen Transformatoren mit guter Näherung $X_T = Z_T$ gilt.

Der *Leerlaufversuch* wird bei Bemessungsspannung durchgeführt. Der dabei gemessene Leerlaufstrom I_l ist so klein, daß die Spannungsabfälle über den Längszweig in der Ersatzschaltung vernachlässigt und die Bemessungsspannung unmittelbar am Querzweig anliegend angenommen werden kann. Die aufgenommene Wirkleistung entspricht fast ausnahmslos den *Eisenverlusten*, die deshalb auch *Leerlaufverluste* heißen. Zur Berücksichtigung der Leerlaufverluste ist die Ersatzschaltung um einen *Ersatzwiderstand* R_{Fe} parallel zur Hauptfeldreaktanz wie in Bild 7.3 zu ergänzen.

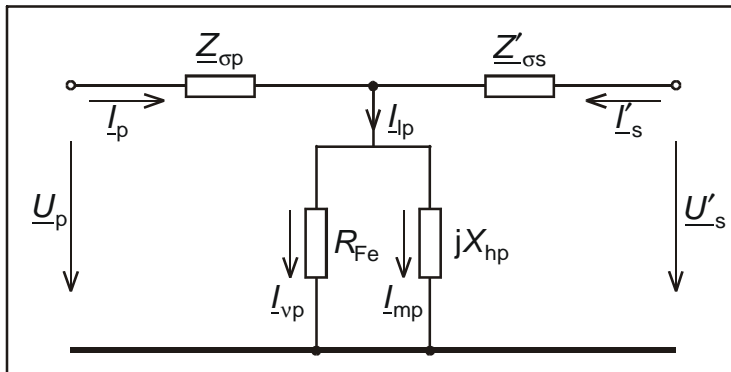


Bild 7.3: Ergänzung der Transformatorersatzschaltung um den Eisenverlustwiderstand R_{Fe}

Aus den *Leerlaufverlusten*:

$$P_{lr} = \sqrt{3} U_{rT} I_{rT} = \frac{U_{rT}^2}{R_{Fe}} \quad (7.10)$$

ergibt sich der *Eisenverlustwiderstand* wie folgt:

$$R_{Fe} = \frac{U_{rT}^2}{P_{lr}} \quad (7.11)$$

Die auf die Bemessungsleistung bezogenen Leerlaufverluste liegen in der Größenordnung:

$$\frac{P_{lr}}{S_{rT}} = \frac{1}{r_{Fe}} = 0,3 \dots 0,05 \%$$

wobei die kleinen Werte für große Transformatoren gelten (s. Bild 7.4).

Der *Magnetisierungsstrom* I_m und der von den Eisenverlusten verursachte Wirkstrom I_v stehen senkrecht aufeinander, und es gilt normalerweise $I_m \gg I_v$ und damit $I_l \cong I_m$. Im *Bemessungsbetrieb* berechnet sich der Magnetisierungsstrom aus:

$$I_{mr} = \frac{U_{rT}}{\sqrt{3} X_h} \quad (7.12)$$

Der auf den Bemessungsstrom bezogene Magnetisierungsstrom ist gleich dem Reziprokwert der bezogenen Hauptfeldreaktanz:

$$\frac{I_{mr}}{I_{rT}} = i_m = \frac{U_{rT}^2}{X_h} = \frac{1}{x_h} \quad (7.13)$$

Für den bezogenen Magnetisierungsstrom und den bezogenen Leerlaufstrom gelten folgende Richtwerte:

$$i_i \approx i_m = 3 \dots 0,3\%$$

wobei die kleinen Werte für große Transformatoren gelten (s. Bild 7.4). Die Größenordnung von i_i rechtfertigt die Vernachlässigung der Querglieder in der Ersatzschaltung in der Nähe des Bemessungsbetriebes, insbesondere bei großen Transformatoren.

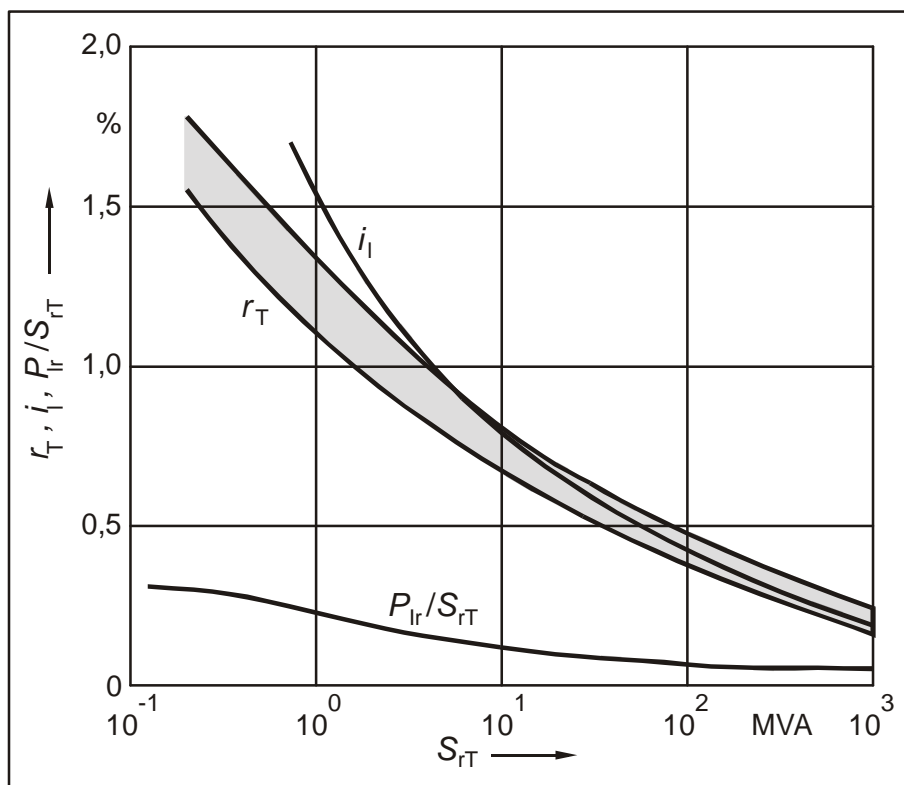


Bild 7.4: Richtwerte für den bezogenen Leerlaufstrom, die bezogenen Leerlaufverluste und den bezogenen Widerstand von Transformatoren

7.2 Mit- und Gegensystemparameter der Dreiwicklungstransformatoren

Der Kurzschlußversuch besteht beim Dreiwicklungstransformator aus drei Messungen, die die drei Impedanzen zwischen je zwei Wicklungen bei leerlaufender dritter Wicklung bestimmen. Damit sind \underline{Z}_{ps} , \underline{Z}_{st} und \underline{Z}_{tp} bekannt. Aus den Leistungsschildangaben oder aus Datenblättern sind gewöhnlich nur die *bezogenen* Impedanzen z_{ps} , z_{st} und z_{pt} zu entnehmen. Die Berechnung der dimensionsbehafteten Impedanzen für eine Spannungsseite erfolgt analog zum Zweiwicklungstransformator (s. Gl. (7.7)), wobei beim Dreiwicklungstransformator aber immer die *Durchgangsleistung* zwischen den beiden entsprechenden Wicklungen im Nenner verwendet

werden muß. Diese ist gleich der kleinsten Bemessungsleistung der beiden entsprechenden Wicklungen. So hat beispielsweise ein Dreiwicklungstransformator mit:

$$S_{rT}^p = 630\text{MVA}, S_{rT}^s = 630\text{MVA} \text{ und } S_{rT}^t = 210\text{MVA}$$

die Durchgangsleistungen:

$$S_{ps} = 630\text{MVA}, S_{pt} = 210\text{MVA}, S_{st} = 210\text{MVA}.$$

Damit lauten die Gleichungen für die Berechnung der dimensionsbehafteten Impedanzen, z.B. für die Primärseite:

$$\boxed{\begin{aligned} Z_{ps} &= \frac{z_{ps} / \% (U_{rT}^p)^2}{100 S_{ps}} \\ Z_{st} &= \frac{z_{st} / \% (U_{rT}^p)^2}{100 S_{st}} \\ Z_{pt} &= \frac{z_{pt} / \% (U_{rT}^p)^2}{100 S_{pt}} \end{aligned}} \quad (7.14)$$

Aus der Ersatzschaltung in Bild 4.14 folgen die Zusammenhänge:

$$\begin{bmatrix} \underline{Z}_{ps} \\ \underline{Z}'_{st} \\ \underline{Z}'_{pt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Z}_p \\ \underline{Z}'_s \\ \underline{Z}'_t \end{bmatrix} \quad (7.15)$$

wobei die Impedanzen \underline{Z}_p , \underline{Z}'_s , und \underline{Z}'_t auf die Primärseite umgerechnet sind. Die formale Auflösung der Gl. (7.15) nach den Wicklungsimpedanzen liefert:

$$\begin{bmatrix} \underline{Z}_p \\ \underline{Z}'_s \\ \underline{Z}'_t \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{Z}_{ps} \\ \underline{Z}'_{st} \\ \underline{Z}'_{pt} \end{bmatrix} \quad (7.16)$$

Die Umrechnung auf eine andere Spannungsseite erfolgt mit dem Quadrat des entsprechenden Übersetzungsverhältnisses. Bei der Berechnung der Beträge Z_p , Z'_s und Z'_t nach Gl. (7.16) kann es vorkommen, daß eine dieser Impedanzen negativ wird (meist Z'_s), was jedoch ohne Belang ist, da die Wicklungsimpedanzen nie allein wirksam sind.

7.3 Nullsystemparameter

Im Nullsystem rechnet man bis auf die *Hauptfeldreaktanz* bei *Dreischenkeltransformatoren* mit den gleichen Parametern wie für das Mitsystem. Dreischenkeltransformatoren haben im Gegensatz zur Drehstrombank und zum Fünfschenkeltransformator keinen freien magnetischen Rückschluß, so daß sich ein Nullfluß außerhalb des Eisenkreises schließen muß. Der ihm dort entgegengebrachte magnetische Wider-

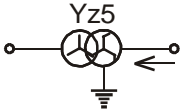
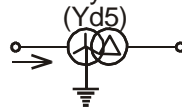
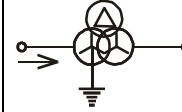
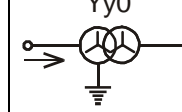
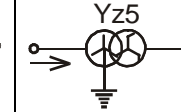
stand ist wesentlich größer als der des Eisenkreises. Folglich wird die Hauptreaktanz X_{h0} merklich kleiner als X_{h1} , was wir durch den Faktor k_0 an der Hauptfeldreaktanz im Nullsystem berücksichtigt haben (s. Abschnitt 4.1.1). Man rechnet mit:

$$X_{h0} = k_0 X_{h1} = (4...8) X_{ps} \tag{7.17}$$

wobei X_{ps} die Summe aus primär- und sekundärseitiger Streureaktanz ist. Während im Mit- und Gegensystem stets $X_h \gg X_{ps}$ gilt und deshalb meist vernachlässigt werden kann, ist beim Dreischenkeltransformator im Nullsystem die Vernachlässigung der Hauptreaktanz nicht von vornherein gerechtfertigt.

Eine Übersicht über die Größenordnungen der Eingangsimpedanzen (s. Pfeil) im Nullsystem gibt die Tabelle 7.1. Nur die Schaltgruppen mit $X_0 / X_1 \leq 1$ sind im Sternpunkt voll belastbar.

Tabelle 7.1: Nullimpedanzen von Transformatoren

$\frac{X_0}{X_1}$					
3SK	0,1...0,15	0,7...1	1...2,4	3...10	
5SK u. DB		1		10...100	

8 Betriebsverhalten

8.1 Leerlauf

8.1.1 Leerlauf des Einphasentransformators

Im *Leerlauf* an einer starren sinusförmigen Spannung wird dem Transformator ein sinusförmiger Magnetfluß eingeprägt. Aufgrund der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie wird der Magnetisierungsstrom verzerrt. Er enthält neben der Grundschwingung auch *Oberschwingungen*, wobei aufgrund der Symmetrie der Magnetisierungskennlinie alle ungeradzahigen Harmonischen auftreten. Mit wachsender Ordnungszahl nehmen allerdings die Amplituden der einzelnen Harmonischen ab. Besonders stark ist gewöhnlich die dritte Harmonische im Strom- oder in der Strangspannung ausgeprägt. Der *Leerlaufstrom* des Transformators setzt sich aus dem *Magnetisierungsstrom* und dem *Wirbelstrom*, der eine Hysterese der Magnetisierungskennlinie verursacht, zusammen. Der Wirbelstrom ist sinusförmig und beeinflusst so nur die Grundschwingung des Leerlaufstromes. Er hat eine Phasenverschiebung von $\pi/2$ gegenüber der Grundschwingung des Magnetisierungsstromes. In den Ersatzschaltungen des Transformators wird nur der Grundschwingungsanteil des Leerlaufstromes bzw. des Magnetisierungsstromes berücksichtigt.

8.1.2 Leerlauf des Dreiphasentransformators

Die Verzerrung des Magnetisierungsstromes von Dreiphasentransformatoren hängt von der Art der Wicklungsschaltung (Sternschaltung mit oder ohne Sternpunktterdung, Dreiecksschaltung oder Zickzack-Schaltung) und von der Kernbauart ab. Diese Einflüsse sind sehr vielfältig und kompliziert, so daß sie hier nicht erschöpfend behandelt werden können.

Sternschaltung mit geerdetem Sternpunkt

Bei Leerlauf an einem symmetrischen, sinusförmigen Spannungssystem (Mitsystem) bildet sich auch ein Mitsystem für die Schenkelflüsse aus. Die Schenkelflüsse addieren sich in jedem Zeitpunkt zu Null, so daß die Kernbauart keine Rolle spielt. Aufgrund der nichtlinearen Magnetisierungskennlinie bilden sich in jedem Wicklungsstrang verzerrte Magnetisierungsströme aus, die wie beim Einphasentransformator alle ungeradzahigen Harmonischen enthalten. Wegen der Phasenverschiebung der Flüsse von jeweils $2\pi/3$ weisen auch die drei Magnetisierungsströme eine Phasenverschiebung von jeweils $2\pi/3$ auf. Bei Vernachlässigung der magnetischen Unsymmetrie gilt somit:

$$\begin{aligned} i_{ma} &= \hat{i}_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + \hat{i}_3 \cos 3(\omega_0 t + \varphi_3) + \hat{i}_5 \cos 5(\omega_0 t + \varphi_5) + \dots \\ i_{mb} &= \hat{i}_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1 - \frac{2\pi}{3}) + \hat{i}_3 \cos 3(\omega_0 t + \varphi_3 - \frac{2\pi}{3}) + \hat{i}_5 \cos 5(\omega_0 t + \varphi_5 - \frac{2\pi}{3}) + \dots \\ i_{mc} &= \hat{i}_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1 + \frac{2\pi}{3}) + \hat{i}_3 \cos 3(\omega_0 t + \varphi_3 + \frac{2\pi}{3}) + \hat{i}_5 \cos 5(\omega_0 t + \varphi_5 + \frac{2\pi}{3}) + \dots \end{aligned}$$

Die Grundschwingungen der Magnetisierungsströme bilden ebenfalls ein Mitsystem. Die dritten Harmonischen und allgemein alle durch 3 teilbaren Harmonischen bilden ein Nullsystem, während die 7., 13., 19. usw. Harmonischen wieder ein Mitsystem und die 5., 11., 17. usw. ein Gegensystem bilden, deren Ströme sich jeweils zu Null

addieren. Die Summe der gleichphasigen Harmonischen der Magnetisierungsströme fließt über die Sternpunkt-Erde-Verbindung ins Netz.

Sternschaltung mit nicht geerdetem Sternpunkt

Das Netz prägt jetzt nicht mehr die Strangspannungen, sondern die verketteten Spannungen und die damit verbundenen Differenzen von zwei Schenkelfläßen ein. Harmonische im Magnetisierungsstrom, die ein Nullsystem bilden, können sich aufgrund der fehlenden Sternpunkt-Erde-Verbindung nicht ausbilden. Geht man von den gleichen Magnetisierungskennlinien der Schenkel wie für den Fall des geerdeten Sternpunktes aus, so können bei „fehlenden“ Harmonischen in den Magnetisierungsströmen, die Magnetflüsse nicht mehr sinusförmig sein. Die im Magnetisierungsstrom fehlenden, durch 3 teilbaren Harmonischen treten dann in den Schenkelfläßen auf. In der Differenz zweier Schenkelfläße, die von der anliegenden sinusförmigen verketteten Netzspannung eingepägt wird, fallen sie heraus. Die durch 3 teilbaren Harmonischen der Schenkelfläße müssen sich auf dem magnetischen Rückschluß schließen. Dieser hängt von der Kernbauart ab. Bei freiem magnetischen Rückschluß könne sich die durch 3 teilbaren Harmonischen der Schenkelfläße stärker ausprägen, als bei erzwungenem magnetischen Rückschluß.

Dreiecksschaltung

Ist die leerlaufende Wicklung im Dreieck geschaltet, so liegt wie beim Fall der Sternschaltung mit geerdetem Sternpunkt jeder Wicklungsstrang an der sinusförmigen Netzspannung, wodurch sinusförmige Schenkelfläße eingepägt werden, die sich in jedem Zeitpunkt zu Null addieren. Die Kernbauart ist damit wie bei der Sternschaltung mit geerdetem Sternpunkt belanglos. Die Magnetisierungsströme enthalten demnach alle ungeradzahigen Harmonischen. Die durch 3 teilbaren Harmonischen des Magnetisierungsstromes, die jeweils ein Nullsystem bilden, fließen ausschließlich im Inneren der Dreieckswicklung.

8.2 Kurzschluß

Bei *dreipoligem* Kurzschluß sind die Magnetisierungserscheinungen von untergeordneter Bedeutung. Der Kurzschlußstrom wird durch die Wicklungswiderstände und Wicklungsstreureaktanzen, die das Längsglied der Ersatzschaltung bilden, bestimmt. Bild 8.1 zeigt das Zeigerbild für dreipoligen Kurzschluß auf der Sekundärseite eines Zweiwicklungstransformators.

Das Verhältnis des Kurzschlußstromes, bezogen auf den Bemessungsstrom, entspricht dem Reziprokwert der Kurzschlußspannung. Aus:

$$\underline{U}_{pk} = (R_T + jX_T) I_{pk}$$

folgt für $U_{pk} = U_{rT} / \sqrt{3}$:

$$\frac{I_{pk}}{I_{rT}} = \frac{1}{\sqrt{R_T^2 + X_T^2}} \frac{U_{rT}}{\sqrt{3} I_{rT}} = \frac{1}{z_T} = \frac{1}{u_k} \quad (8.1)$$

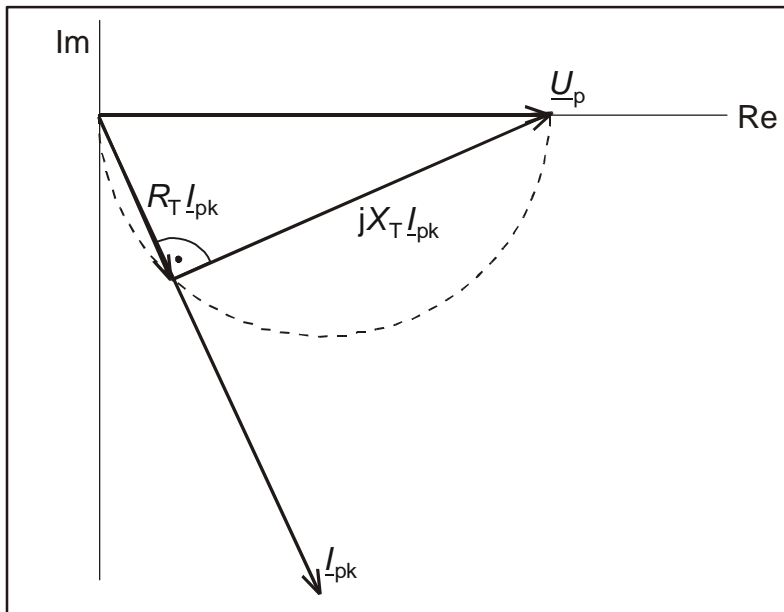


Bild 8.1: Zeigerbild für dreipoligen Kurzschluß eines Zweiwicklungstransformators

Die Berechnung unsymmetrischer Kurzschlüsse erfolgt mit Hilfe der Symmetrischen Komponenten.

8.3 Spannungsabfall, Belastungskennlinien

Im folgenden ist stets symmetrischer Betrieb vorausgesetzt. Außerdem soll der Leerlaufstrom vernachlässigt werden. Wir können dann von der vereinfachten Ersatzschaltung ohne Querglied ausgehen und erhalten für die Spannungen, wenn wir jetzt die Primärgrößen auf die betrachtete Sekundärseite umrechnen und anstelle I_s den Belastungsstrom einführen, also $I_s = -I$ setzen:

$$\underline{U}'_p = \underline{U}_s + (R_T + jX_T)I \tag{8.2}$$

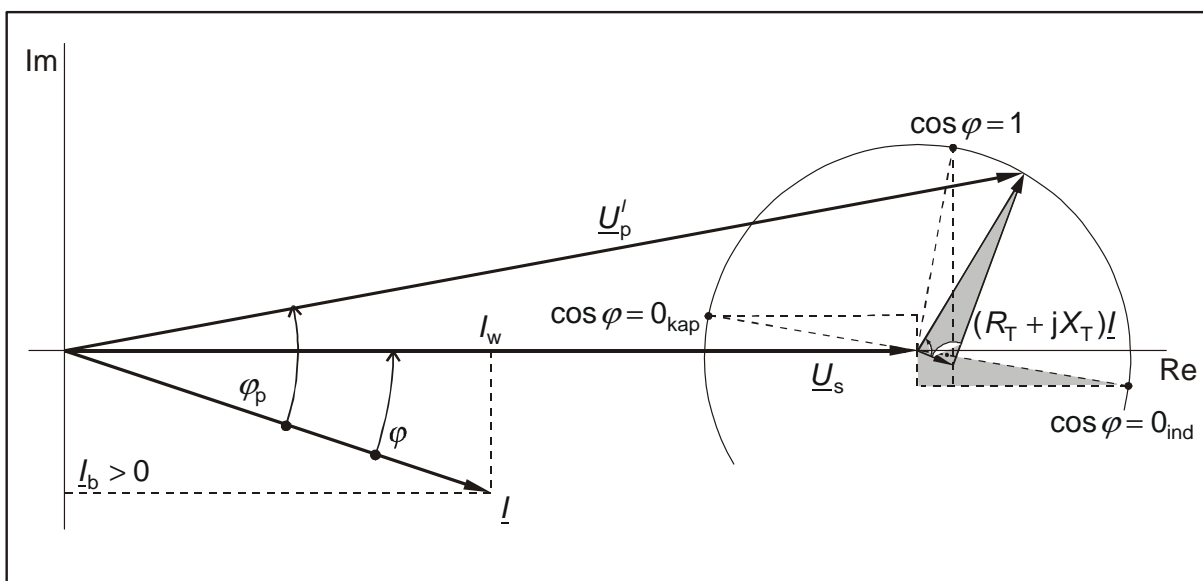


Bild 8.2: Zeigerbild des Zweiwicklungstransformators auf der Grundlage der Gl. (8.2)

Beginnend mit der Spannung \underline{U}_s , die wir in die reelle Achse legen, und dem Belastungsstrom \underline{I} ergibt sich das Zeigerbild in Bild 8.2, in dem auch die Sonderfälle der rein resistiven, rein induktiven und rein kapazitiven Belastung eingetragen sind. Das zwischen den Zeigern \underline{U}'_p und \underline{U}_s liegende Dreieck für die Spannungsabfälle wird KAPP'sches Dreieck genannt. Seine Lage und Größe sind belastungsabhängig. Bei festem Strombetrag I und fester Spannung U'_p (Transformator am starren Netz) läßt sich die Spannungsdifferenz $\Delta U = U'_p - U_s$ in Abhängigkeit vom Leistungsfaktor der Belastung $\cos \varphi$ anschaulich anhand des KAPP'schen Diagramms ermitteln (Bild 8.3).

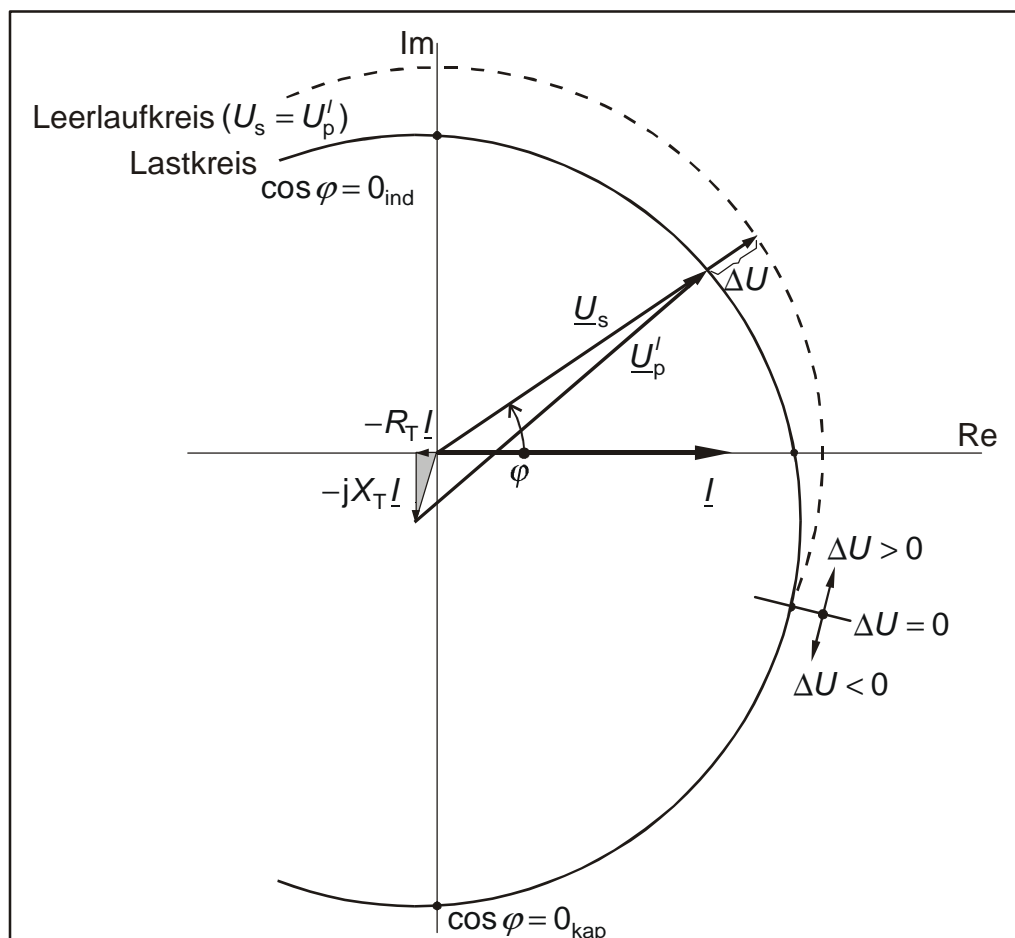


Bild 8.3: KAPP'sches Diagramm

Im KAPP'schen Diagramm wird der Stromzeiger \underline{I} mit konstantem Betrag in der reellen Achse festgehalten, so daß auch das KAPP'sche Dreieck in der eingezeichneten Lage liegen bleibt. Der Spannungszeiger \underline{U}'_p mit konstantem Betrag und der Spannungszeiger \underline{U}_s mit veränderlichem Betrag bewegen sich bei veränderlichem Leistungsfaktor der Belastung auf dem *Lastkreis*, dessen Ursprung in der Spitze des KAPP'schen Dreiecks liegt. Bei Leerlauf würde der Ursprung des Lastkreises in den Koordinatenursprung rücken und so zum *Leerlaufkreis* werden. Die Spannungsdifferenz $\Delta U = U'_p - U_s$ greift man in Richtung von U_s zwischen den beiden Kreisen ab. Im Schnittpunkt der beiden Kreise ist $\Delta U = 0$. Dieser Sonderfall tritt bei ohmsch, kapazitiver Belastung auf. Bei weiterer Erhöhung des kapazitiven Belastungsanteils kehrt sich das Vorzeichen von ΔU um, es kommt zu einer Spannungserhöhung auf der Sekundärseite.

Rechnerisch ermitteln wir die Spannungsdifferenz am einfachsten ausgehend von Gl. (8.2), indem wir \underline{U}_s in die reelle Achse legen. Es gilt dann:

$$\underline{U}'_p = U_s + (R_T + jX_T)(I_w - jI_b) \quad (8.3)$$

Die Zerlegung in Real- und Imaginärteil ergibt unter Beachtung von $I_w = I \cos \varphi$ und $I_b = I \sin \varphi$

$$\operatorname{Re}\{\underline{U}'_p\} = U_s + R_T I_w + X_T I_b = U_s + R_T I \cos \varphi + X_T I \sin \varphi = U_s + \Delta U_l$$

$$\operatorname{Im}\{\underline{U}'_p\} = X_T I_w - R_T I_b = X_T I \cos \varphi - R_T I \sin \varphi = \Delta U_q$$

Beide Gleichungen werden quadriert und addiert:

$$U_p^2 = (U_s^2 + \Delta U_l^2) + \Delta U_q^2$$

Mit ΔU_l und ΔU_q wurden der *Längs-* und *Querspannungsabfall* eingeführt. Schließlich ergibt sich:

$$\Delta U = U'_p - U_s = \sqrt{(U_s + \Delta U_l)^2 + \Delta U_q^2} - U_s \quad (8.4)$$

Gewöhnlich sind die Spannungsabfälle ΔU_l und ΔU_q klein gegenüber U_s , so daß Gl. (8.4) in guter Näherung durch:

$$\Delta U = U_s \sqrt{1 + \frac{2\Delta U_l}{U_s}} - U_s \approx U_s \left(1 + \frac{\Delta U_l}{U_s}\right) - U_s = \Delta U_l = (R_T \cos \varphi + X_T \sin \varphi) I \quad (8.5)$$

ersetzt werden kann. Die Spannungsdifferenz wird demzufolge hauptsächlich durch den Längsspannungsabfall verursacht. Dieser wird wiederum hauptsächlich durch den Blindstrom bestimmt, denn es gilt bekanntlich $R_T \ll X_T$. Bezieht man Gl. (8.5) noch auf die sekundärseitige Bemessungsspannung U_{rT}^s , so wird:

$$\frac{\Delta U}{U_{rT} / \sqrt{3}} = \Delta u = (r_T \cos \varphi + x_T \sin \varphi) \frac{I}{I_{rT}^s} = (r_T \cos \varphi + x_T \sin \varphi) b \quad (8.6)$$

wobei r_T und x_T die bezogenen Transformatorparameter in p.u. sind, und I_{rT}^s der sekundärseitige Bemessungsstrom ist. Das Stromverhältnis $b = I / I_{rT}^s$ ist der *Belastungsgrad*. Im *Bemessungsbetrieb* wird $b = 1$ und damit:

$$\Delta u_r = r_T |\cos \varphi| + x_T |\sin \varphi| \approx x_T |\sin \varphi|$$

In Bild 8.4 ist für $r_T = 0,02$ und $x_T = 0,2$ die bezogene Sekundärspannung bei Anlegen der Bemessungsspannung auf der Primärseite in Abhängigkeit von b mit $\cos \varphi$ als Parameter maßstäblich dargestellt.

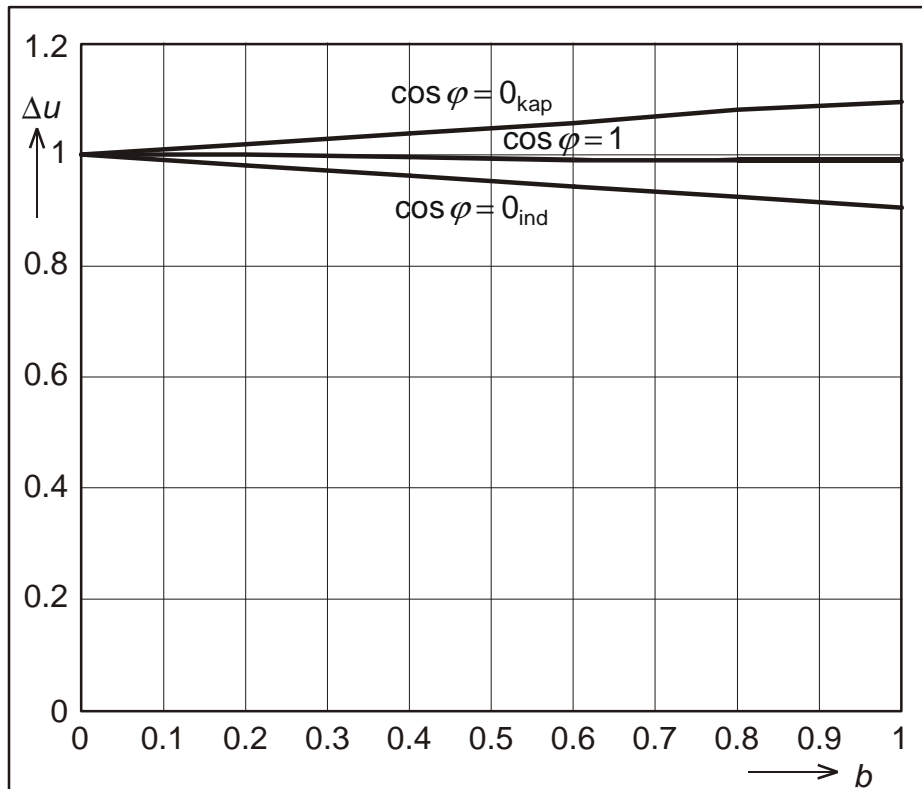


Bild 8.4: Belastungskennlinien des Transformators

8.4 Verluste, Wirkungsgrad, Blindleistungsbedarf

Die Gesamtverluste P_V setzen sich aus den *Eisen-* oder *Leerlaufverlusten* P_l und den *Wicklungs-* oder *Kurzschlußverlusten* P_k zusammen. Die Bezeichnungen Leerlauf und Kurzschluß verweisen auf den Versuch, in dem die jeweiligen Verlustanteile bestimmt werden. Wir haben in Kapitel 7 gesehen, daß die Leerlaufverluste spannungsabhängig und annähernd dem Quadrat der Spannung proportional sind (der maßgebende Ersatzwiderstand R_{Fe} bildet ein Querglied in der Ersatzschaltung parallel zu X_h), während die Kurzschlußverluste dem Quadrat des Stromes proportional sind (die maßgebenden Wicklungswiderstände liegen im Längszweig der Ersatzschaltung). Für die Berechnung der Kurzschlußverluste in einem bestimmten Betriebspunkt können die Widerstände der Primär- und Sekundärwicklung zu $R_T^p = R_p + R'_s$ oder $R_T^s = R'_p + R_s$ zusammengefaßt werden. Der obere Index p oder s wird aber meist weggelassen. Für die Gesamtverluste gilt folgende Beziehung:

$$P_V = P_l + P_k = 3 \frac{U^2}{R_{Fe}} + 3R_T I^2 \quad (8.7)$$

Im *Bemessungsbetrieb* wird:

$$P_{lr} = \frac{U_{rT}^2}{R_{Fe}} = \frac{S_{rT}}{r_{Fe}} \quad (8.8)$$

$$P_{kr} = 3R_T I_{rT}^2 = r_T S_{rT} \quad (8.9)$$

und:

$$P_{Vr} = P_{lr} + P_{kr} = \left(\frac{1}{r_{Fe}} + r_T \right) S_{rT} \quad (8.10)$$

Unter Benutzung dieser Beziehungen formen wir Gl. (8.7) um zu:

$$P_V = P_{lr} \left(\frac{\sqrt{3}U}{U_{rT}} \right)^2 + P_{kr} \left(\frac{I}{I_{rT}} \right)^2 \quad (8.11)$$

und für den üblichen Betrieb mit *Bemessungsspannung*:

$$P_V = P_{kr} \left(\frac{P_{lr}}{P_{kr}} + \left(\frac{I}{I_{rT}} \right) \right)^2 = P_{kr} (a + b^2) \quad (8.12)$$

wobei mit $a = P_{lr} / P_{kr}$ das *Verlustverhältnis* eingeführt wurde. b ist der bereits in Gl. (8.6) benutzte *Belastungsgrad*. Mit $b = 1$ ergibt sich für den *Bemessungsbetrieb*:

$$P_{Vr} = (a + 1) P_{kr}$$

Damit erhalten wir für die auf P_{Vr} bezogenen Verluste folgenden Ausdruck:

$$\frac{P_V}{P_{Vr}} = \frac{a + b^2}{a + 1} \quad (8.13)$$

In Bild 8.5 ist die Gl. (8.13) für zwei verschiedene Verlustverhältnisse a in Abhängigkeit vom Belastungsgrad $b = I / I_{rT}$ ausgewertet, wobei deutlich wird, daß durch die Wahl eines kleineren Verlustverhältnisses kleinere Teillastverluste entstehen.

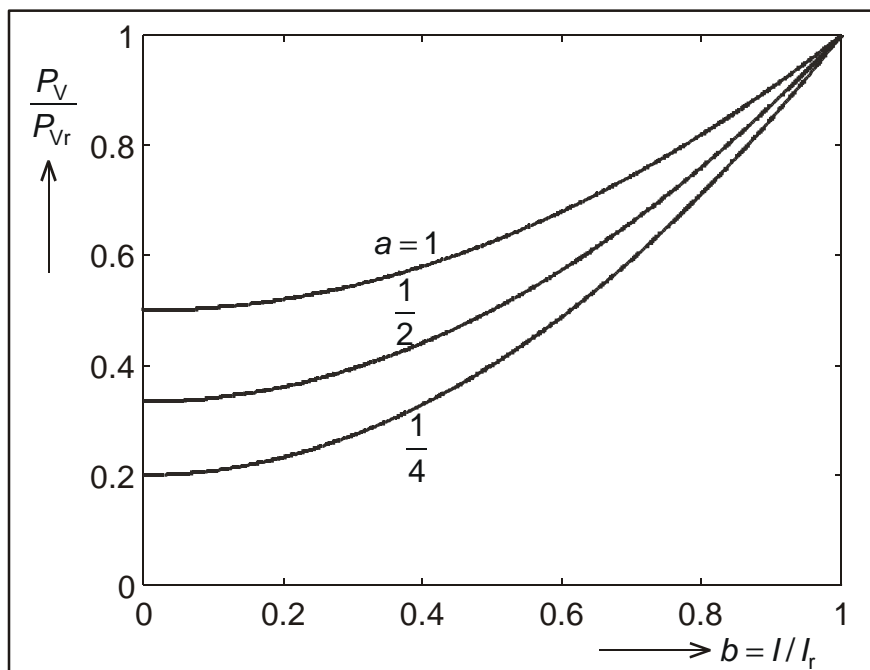


Bild 8.5: Verlustkurven in Abhängigkeit von der Belastung mit dem Verlustverhältnis als Parameter

Der *Wirkungsgrad* berechnet sich aus:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{auf}} = \frac{P}{P + P_V} = \frac{1}{1 + \frac{P_V}{P}} = \frac{1}{1 + \frac{P_V}{S \cos \varphi}} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_V}{\cos \varphi}} \quad (8.14)$$

wobei S die Scheinleistung und $\cos \varphi$ der Leistungsfaktor auf der Abnahmeseite und $\rho_V = P_V / S$ die *relativen*, auf den jeweiligen Belastungszustand bezogenen Verluste sind. Für die relativen Verluste erhält man aus Gl. (8.12) durch Erweitern mit S_{rT} im Zähler und Nenner und unter Beachtung von $S \sim I$ bei konstant angenommener Spannung auf der Abnehmerseite:

$$\rho_V = \frac{P_V}{S} = \frac{P_{kr}}{S_{rT}} \cdot \frac{S_{rT}}{S} (a + b^2) = \frac{P_{kr}}{S_{rT}} \left(\frac{a}{b} + b \right) = r_T \left(\frac{a}{b} + b \right) \quad (8.15)$$

und damit für den Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{r_T}{\cos \varphi} \left(\frac{a}{b} + b \right)} \quad (8.16)$$

Der Wirkungsgrad ist bei festem Abnahme- $\cos \varphi$ bei *der* Belastung maximal, bei der die relativen Verluste minimal werden. Aus:

$$\frac{d\rho_V}{db} = r_T \left(-\frac{a}{b^2} + 1 \right) = 0$$

folgt somit für den maximalen Wirkungsgrad ein optimaler Belastungsgrad von

$$b = b_{opt} = \sqrt{a} \quad (8.17)$$

und damit:

$$\eta_{max} = \frac{1}{1 + \frac{r_T}{\cos \varphi} 2\sqrt{a}} \approx 1 - \frac{r_T}{\cos \varphi} 2\sqrt{a} \quad (8.18)$$

Aus Gl. (8.17) folgt weiter:

$$b_{opt}^2 = \left(\frac{I_{opt}}{I_{rT}} \right)^2 = a = \frac{P_{lr}}{P_{kr}} \quad (8.19)$$

oder

$$P_k = P_{kr} \left(\frac{I_{opt}}{I_{rT}} \right)^2 = P_{lr} \quad (8.20)$$

Gl. (8.19) besagt, daß der Wirkungsgrad bei festem $\cos \varphi$ und festem Verlustverhältnis bei *der* Belastung maximal wird, bei der die stromabhängigen Kupferverluste den

Eisenverlusten gleich werden. Ein Transformator mit $a = 1$ hat demzufolge den maximalen Wirkungsgrad im Bemessungsbetrieb. Transformatoren, die während ihres Betriebes nicht ständig ausgelastet oder stark schwankender Belastung ausgesetzt sind, verursachen geringere Verlustkosten, wenn sie mit $a < 1$ ausgeführt sind.

Aus den Gln. (8.18) und (8.19) ergeben sich bei festem $\cos \varphi$ zwei wichtige, aus Bild 8.6 ersichtliche Schlußfolgerungen:

1. Transformatoren mit kleinerem Verlustverhältnis haben einen größeren maximalen Wirkungsgrad
2. Der Maximalwert des Wirkungsgrades stellt sich bei der Belastung ein, bei der die Kupferverluste den Eisenverlusten gleich werden

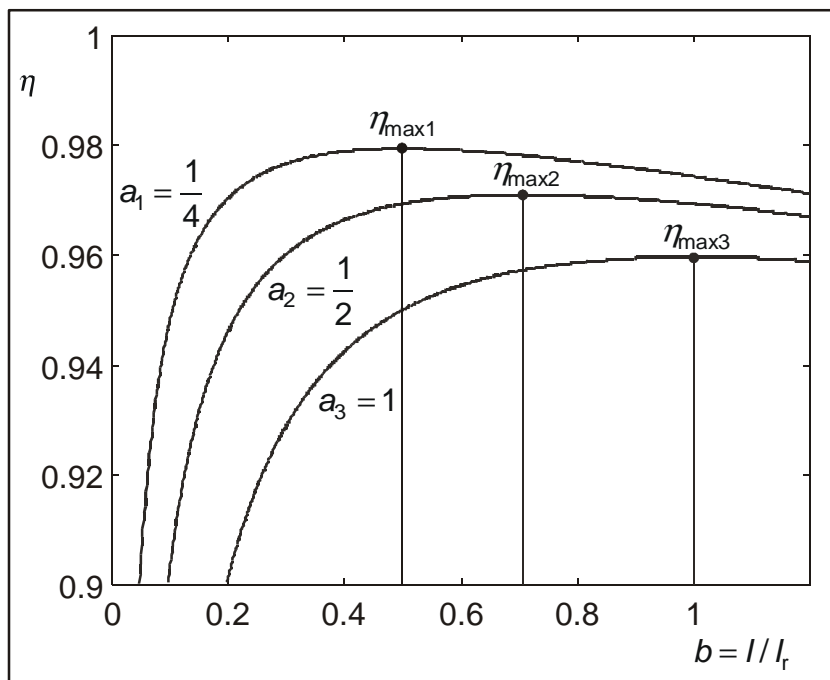


Bild 8.6: Verlauf des Wirkungsgrades in Abhängigkeit vom Belastungsverhältnis bei $a = 1, 1/2$ und $1/4$, $\cos \varphi = 0,95$ und $r_T = 1\%$

Der Blindleistungsbedarf des Transformators setzt sich aus der *Magnetisierungsblindleistung* Q_m und der *Wicklungsblindleistung* Q_x zusammen:

$$Q = Q_m + Q_x$$

Die Magnetisierungsblindleistung ist spannungsabhängig:

$$Q_m = 3X_h I_m^2 = 3 \frac{U^2}{X_h} \quad (8.21)$$

während die Wicklungsblindleistung stromabhängig ist:

$$Q_x = 3X_T I^2 \quad (8.22)$$

Im *Bemessungsbetrieb* wird:

$$Q_{mr} = \frac{U_{rT}^2}{X_h} = \frac{S_{rT}}{x_h} = i_m S_{rT} \quad (8.23)$$

und

$$Q_{xr} = 3X_T I_{rT}^2 = x_T \sqrt{3} U_{rT} I_{rT} = x_T S_{rT} \quad (8.24)$$

sowie:

$$Q_r = (i_m + x_T) S_{rT} \quad (8.25)$$

Aus der folgenden Gleichung kann man bei Kenntnis von i_m (auf I_{rT} bezogener Magnetisierungsstrom) oder x_h und x_T sofort auf den Blindleistungsbedarf im Bemessungsbetrieb schließen:

$$q_r = \frac{Q}{S_{rT}} = q_{mr} + q_{xr} = i_m + x_T = \frac{1}{x_h} + x_T \quad (8.26)$$

8.5 Parallelbetrieb

Für den in Bild 8.7 dargestellten Parallelbetrieb von 2 Transformatoren müssen folgende 4 Bedingungen erfüllt sein:

1. Gleiche Schaltgruppen
2. Gleiche Übersetzungsverhältnisse
3. Annähernd gleiche Kurzschlußspannungen
4. Verhältnis der Bemessungsleistungen nicht größer als 3:1

Die erste und zweite Bedingung sorgen für gleiche Spannungen im Leerlauf, wodurch Ausgleichsströme vermieden werden, während die dritte und vierte Bedingung für eine vernünftige Stromaufteilung bei Belastung sorgen. Die Teilströme I_1 und I_2 stehen bei gleicher Bemessungsspannung und annähernd gleichen Kurzschlußspannungen im Verhältnis:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_{T1}}{Z_{T2}} = \frac{u_{k1}}{u_{k2}} \cdot \frac{S_{rT1}}{S_{rT2}} \approx \frac{S_{rT1}}{S_{rT2}}$$

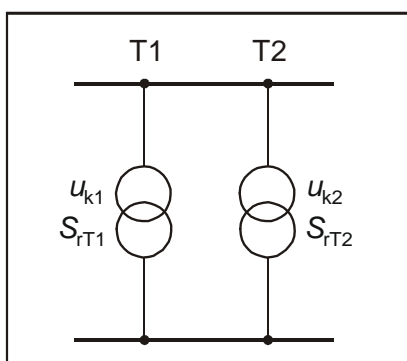


Bild 8.7: Parallelschaltung von zwei Transformatoren

Bei wechselnder Belastung stellt sich die Frage nach dem *wirtschaftlichen* Parallelbetrieb. In Bild 8.8 sind die relativen Verluste nach Gl. (8.13) von zwei gleichen, parallelbetriebenen Transformatoren mit $a = 1/4$ über dem bezogenen Gesamtstrom I aufgetragen. Die Verlustkurve *eines* Transformators und die resultierende Verlustkurve für den Parallelbetrieb schneiden sich bei dem Umschaltstrom I_u . Liegt die Belastung längere Zeit unter I_u , so ist es aus der Sicht der Verlusteinsparung sinnvoll, den zweiten Transformator außer Betrieb zu nehmen. Für Belastungen oberhalb I_u ist der Parallelbetrieb wirtschaftlicher. Der Umschaltpunkt berechnet sich aus dem Schnittpunkt der Verlustkurven:

$$P_V^{(1)} = P_{lr} + P_{kr} \left(\frac{I_u}{I_{rT}} \right)^2 = P_V^{(2)} = 2 \left(P_{lr} + P_{kr} \left(\frac{I_u}{2I_{rT}} \right)^2 \right)$$

wobei P_{lr} und P_{kr} die Verluste *eines* Transformators sind. Man erhält für den (bezogenen) Umschaltstrom:

$$\frac{I_u}{I_{rT}} = \sqrt{2 \frac{P_{lr}}{P_{kr}}} = \sqrt{2a}$$

Im Bild 8.8 mit $a = 1/4$ liegt der Umschaltpunkt bei $\frac{I_u}{I_{rT}} = \sqrt{2 \cdot \frac{1}{4}} = \sqrt{\frac{1}{2}} \approx 0,71$

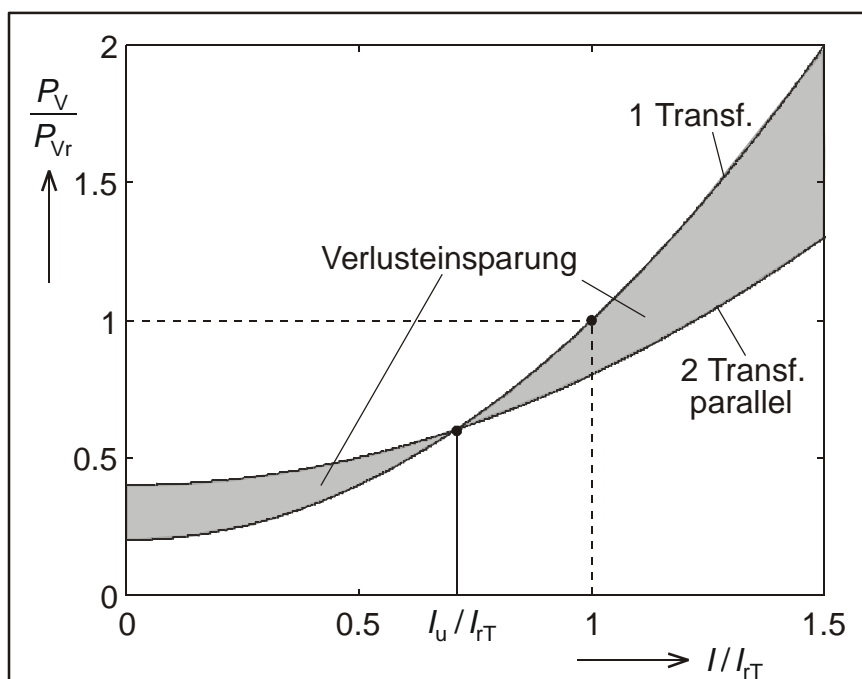


Bild 8.8: Verlustkurven bei Transformator-Parallelbetrieb