

3 Drehstromtransformatoren

3.1 Schaltgruppen

In der folgenden Übersicht (Tabelle 3.1.1) sind die wichtigsten Schaltgruppen für Drehstromtransformatoren mit Zeigerbild, Übersetzung, Kennzahl und Schaltung angegeben. Dabei bezeichnet man die Wicklungen mit der betriebsmäßig höchsten Spannung als Oberspannungswicklungen und kennzeichnet sie durch die vorgestellte Ziffer 1 vor den Anschlussbezeichnungen U, V, W.

Sinngemäß erhalten die Unterspannungswicklungen die Ziffer 2 und weitere Spannungsebenen mit abnehmender Spannung fortlaufend höhere Ziffern. Die Wicklungen selbst können in

Dreieck: D, d
Stern: Y, y
Zickzack: Z, z

verschaltet sein, wobei Großbuchstaben für die Oberspannungswicklung und Kleinbuchstaben für die Unterspannungswicklung stehen und in dieser Reihenfolge als Schaltgruppe des Drehstromtransformators bezeichnet werden. Ist in der jeweiligen Spannungsebene der Sternpunkt herausgeführt, so wird dies durch ein nachgestelltes **N, n** verdeutlicht.

Darüber hinaus wird durch die anschließende Kennzahl die Nacheilung der Unterspannung gegenüber der namensgleichen Oberspannung als Vielfaches von 30° angegeben.

Beispiel: Yzn5
Oberspannungswicklungen in Stern
Unterspannungswicklungen in Zickzack
Sternpunkt der Unterspannungswicklungen herausgeführt
Nacheilung der Unterspannung gegenüber der gleichnamigen Oberspannung $5 \times 30^\circ = 150^\circ$

Die Bezeichnung Ober- bzw. Unterspannungswicklung darf jedoch nicht mit den Begriffen

Primärwicklung \triangle Energieaufnahme
Sekundärwicklung \triangle Energieabgabe

verwechselt werden, die sich allein an der Energierichtung orientieren. Insbesondere muss die Oberspannungswicklung nicht zwangsläufig die Primärwicklung sein.

Kennzahl Code Nr. Indice	Schaltgruppe Connection group Couplage de branch.	Zeigerbild Vektorgroup symbol Schéma de vecteurs		Schaltbild Connection diagram Schéma de couplage		Sekundärer Sternpunkt Secondary neutral point point neutre secondaire
		OS above HT	US below BT	OS above HT	US below BT	
0	D d 0					nicht vorhanden not available non existant
	Y y 0					ca. 10 % belastbar approx. 10 % loadable charge admise 10 % env.
	D z 0					voll belastbar fully loadable charge admise 100 %
5	D y 5					voll belastbar fully loadable charge admise 100 %
	Y d 5					nicht vorhanden not available non existant
	Y z 5					voll belastbar fully loadable charge admise 100 %
6	D d 6					nicht vorhanden not available non existant
	Y y 6					ca. 10 % belastbar approx. 10 % loadable charge admise 10 % env.
	D z 6					voll belastbar fully loadable charge admise 100 %
11	D y 11					voll belastbar fully loadable charge admise 100 %
	Y d 11					nicht vorhanden not available non existant
	Y z 11					voll belastbar fully loadable charge admise 100 %

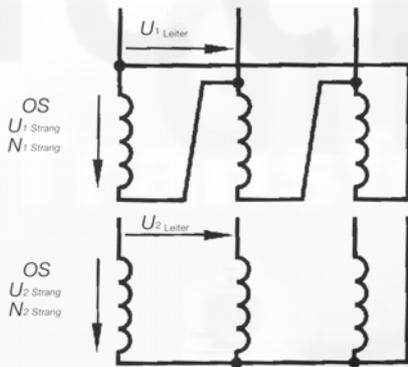
Tabelle 3.1.1: Schaltungen und Schaltgruppen

3.1.1 Übersetzungsverhältnis und Schaltgruppen

Die Stränge der Oberspannungsseite (OS) und der Unterspannungsseite (US) können jeweils in Stern (Y) oder in Dreieck (D) oder Zickzack (Z) geschaltet werden. Der Großbuchstabe bezeichnet die OS, der Kleinbuchstabe die US, ein herausgeführter N-Leiter wird durch den Buchstaben n bezeichnet, z.B. Dyn.

Als Übersetzungsverhältnis wird bei Drehstromtransformatoren das ungekürzte Verhältnis der Außenleiterspannung angegeben, z.B. $\ddot{u} = 20\,000\text{V} / 400\text{V}$.

Beispiel: Dyn-Schaltung (Bild 3.1.1)



Als Übersetzungsverhältnis ist festgelegt:

$$\ddot{u} = U_{1 \text{ Leiter}} / U_{2 \text{ Leiter}}$$

Für die Strangspannung gilt:

$$U_{1 \text{ Strang}} / U_{2 \text{ Strang}} = N_{1 \text{ Strang}} / N_{2 \text{ Strang}}$$

3.2 Last

3.2.1 Symmetrische Last, Schiefast

Große Übertragungs- und Verteilungstransformatoren werden üblicherweise symmetrisch belastet. Für diesen Belastungsfall kann der Transformator in jeder beliebigen Schaltgruppe betrieben werden.

Kleine Verteilungstransformatoren zur Versorgung von Haushalten hingegen werden oft unsymmetrisch, in Ausnahmefällen auch einphasig belastet. Da die US wegen des erforderlichen N-Leiters hier stets eine Y-Schaltung sein muss, kommen nur die Schaltgruppen Yyn und Dyn in Frage.

Gemäß Bild 3.2.4 wird bei einphasiger Belastung einer Yyn-Schaltung ausgangsseitig nur ein Schenkel belastet. Eingangsseitig muss der Strom des belasteten Stranges über die beiden anderen Wicklungen zurückfließen. In den beiden zugehörigen Schenkeln steigt der magnetische Fluss dadurch bis weit in die Sättigung, weil die zugehörige Gegendurchflutung der Ausgangsseite fehlt. Die Ausgangsspannung der unbelasteten Stränge steigt dadurch an. Der N-Leiter einer Yyn-Schaltung darf deshalb nur bis etwa 10% des Leiter-Nennstromes belastet werden.

Bei der Dyn-Schaltung gibt es dieses Problem nicht; sie ist auch einphasig bis zum Nennstrom belastbar.

3.2.2 Unsymmetrische Belastung

3.2.2.1 Durchflutungsgleichgewicht.

Bei gleichmäßiger Belastung aller drei Stränge verhält sich jeder Drehstromtransformator, von den erwähnten Besonderheiten der Magnetisierung abgesehen, wie die einphasige Bauart. Das Betriebsverhalten lässt sich über das bekannte Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm, das jetzt für einen Strang gilt, berechnen. Die Erzeugung des Nutzflusses wird durch die Belastung nicht gestört, da sich für jeden Strang nach Bild 2.2.1 mit $I_1 + I'_2 = I_0 \approx I_u$ stets ein Amperewindungsausgleich einstellt. Mit $I_0 \rightarrow 0$ bedeutet dies, dass jede Durchflutung eines sekundären Laststromes I'_2 durch einen entsprechenden Primärstrom I_1 kompensiert wird.

Anders liegen die Verhältnisse bei unsymmetrischer Strombelastung der drei Stränge, wie sie bei Verteilertansformatoren durch ungleiche Lastverteilung auftreten kann. Da dem Verbraucher mit der Strang- und der Außenleiterspannung die zwei Spannungswerte 230V und 400V zur Verfügung gestellt werden, kommt für die Schaltung der Sekundärwicklung nur eine Stern- oder Zickzackschaltung in Frage. Nachstehend soll nun untersucht werden, inwieweit für verschiedene unsymmetrische Lastfälle in den möglichen Schaltgruppen eine ungestörte Kompensation der Laststrom-Durchflutung möglich ist.

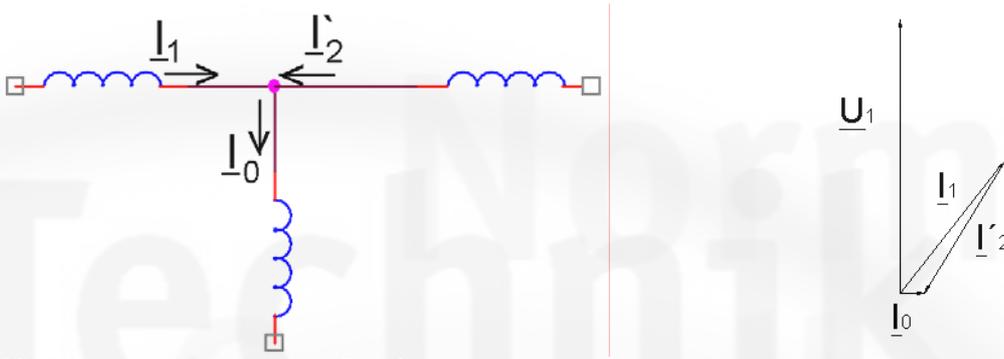


Bild 3.2.1: Lastkompensation beim Transformator

3.2.2.2 Zweisträngige Belastung in Stern-Sternschaltung.

Wird der Transformator in der Schaltgruppe Yyn nach Bild 3.2.3 nur zwischen zwei Außenleitern belastet, so ist das Durchflutungsgleichgewicht nicht gestört. Der Sekundärstrom I_2 in zwei Strängen wurde durch den entsprechenden Strom I_1 kompensiert, die dritte Wicklung bleibt stromlos.

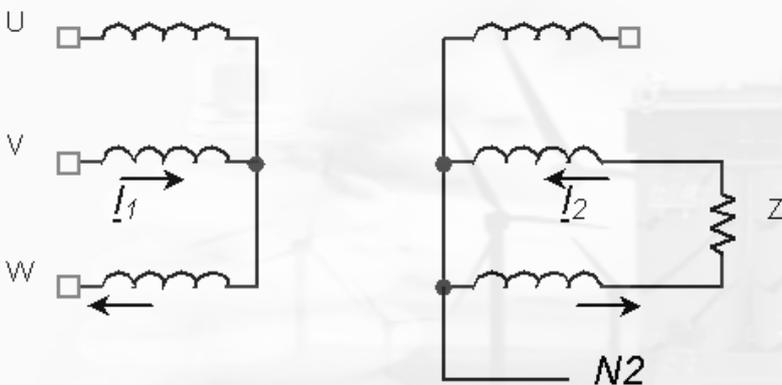


Bild 3.2.3: Zweisträngige Belastung bei Schaltgruppe Yyn

3.2.2.3 Einsträngige Belastung in Stern-Sternschaltung.

Der zweite extrem unsymmetrische Lastfall (Bild 3.2.4) tritt bei einer einsträngigen Last zwischen Außenleiter und Sternpunkt auf. Da der primäre Sternpunktleiter fehlt, ist eine gleichartige Stromaufnahme auf der Eingangsseite nicht möglich, so dass sich die angegebene Verteilung einstellt. Für die Durchflutung des Transformators in der üblichen Dreischenkelbauform ergibt sich damit ein Schema nach Bild 3.2.5.

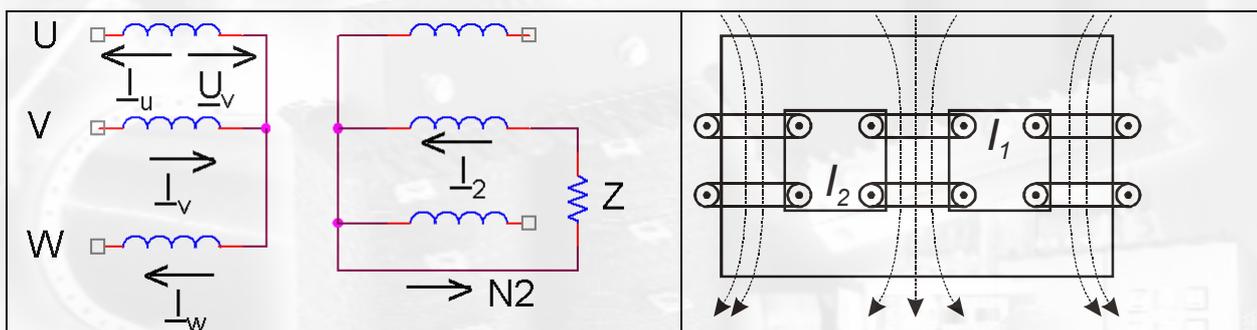


Bild 3.2.4: Einsträngige Belastung bei Schaltgruppe Yyn

Bild 3.2.5: Gleichphasiger Zusatzfluss eines Dreischenkelkerns infolge einsträngiger Belastung

Zur Berechnung der drei primären Strangströme wird zunächst die Knotenpunktgleichung aus Bild 3.2.4 gebildet. Zwei weitere Gleichungen erhält man aus der Bedingung, dass die Summe der Laststrom-Durchflutungen längs der zwei Transformatorfenster in Bild 3.2.5 Null sein müssen. Dies ist erforderlich, da das primärseitig an den Transformator angelegte symmetrische Spannungssystem nur gleichphasige Zusatzflüsse pro Kern zulässt.

Für die Berechnung der Strangströme I_U , I_V und I_W gelten damit die Bedingungen:

Knotenpunktregel	I_U	$-I_V$	$+I_W$	$= 0$
Umlauf linkes Fenster	I_U	$+I_V$	$-I'_2$	$= 0$
Umlauf rechtes Fenster		I_V	$+I_W$	$-I'_2 = 0$

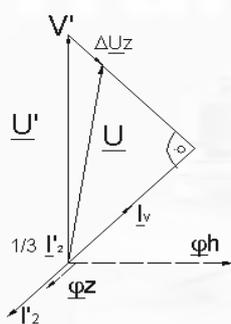
Die Auswertung der drei Gleichungen ergibt die Strangströme

$$I_U = I_W = \frac{1}{3} I'_2 \quad \text{und} \quad I_V = \frac{2}{3} I'_2$$

Damit entstehen folgende resultierende Laststrom-Durchflutungen pro Schenkel

äußere Schenkel:	$\Theta_{zU, W}$	$= N_1 \cdot I_{U, W}$	$= \frac{1}{3} N_1 \cdot I'_2$
mittlerer Schenkel:	Θ_{zV}	$= N_1 (I'_2 - I_V)$	$= \frac{1}{3} N_1 \cdot I'_2$

Diese lastabhängigen Zusatzdurchflutungen erzeugen in allen drei Strängen gleichgerichtete Flüsse φ_z (Bild 3.2.5), die sich über die Luft oder die Kesselwandlung schließen müssen. Sie induzieren in den Strangwicklungen gleichgerichtete Zusatzspannungen ΔU_z , wie dies in Bild 3.2.6 für den Strang V dargestellt ist.



Durch den eigentlichen Magnetisierungsstrom, der wegen $I_U \ll I'_2$ nicht eingetragen ist, entsteht der normale Kernfluss φ_h und die Strangspannung \underline{U}' . Der mit I'_2 ohmsch-induktiv angenommene Laststrom wird durch I_V nur zu zwei Dritteln kompensiert und ergibt zusätzlich die Magnetisierungs-Durchflutung Θ_z . Der Fluss $\varphi_z \sim \Theta_z$ induziert in der Wicklung die Spannung ΔU_z . Die resultierende Strangspannung ist damit $\underline{U} = \underline{U}' + \Delta U_z$.

Bild 3.2.6: Zeigerdiagramm des belasteten Wicklungsstrangs bei einsträngiger Belastung in Schaltgruppe Yyn

3.2.2.4 Sternpunktsverlagerung.

Addiert man zu allen drei Strangspannungen den Zusatzbetrag ΔU_z (Bild 3.2.7), so entstehen die Strangspannungen zwischen $O'U$, $O'V$, $O'W$. Da die Außenleiterwerte und so das Dreieck UVW durch das Netz fest vorgegeben sind, bedeutet dies eine Sternpunktverschiebung von O nach O' . Die einphasig belastete Wicklung bricht in ihrer Strangspannung teilweise zusammen. Inwieweit das geschieht, hängt nach $\varphi_z = \Theta_z \cdot \Lambda_z$ bei gegebener Belastung und damit Θ_z von dem magnetischen Leitwert Λ_z ab, den der Zusatzfluss vorfindet. In der Bauform des Dreischenkelkerns ist der Zusatzfluss auf den Weg von Joch zu Joch, d.h. auf den Streuweg beschränkt. Bei drei zusammengeschalteten Einphasentransformatoren oder dem Fünfschenkelkern kann er sich dagegen recht kräftig auf dem Eisenwege über den freien Rückschluss ausbilden. Hier ist bei Sternpunktbelastung eine starke Nullpunktverschiebung zu erwarten.

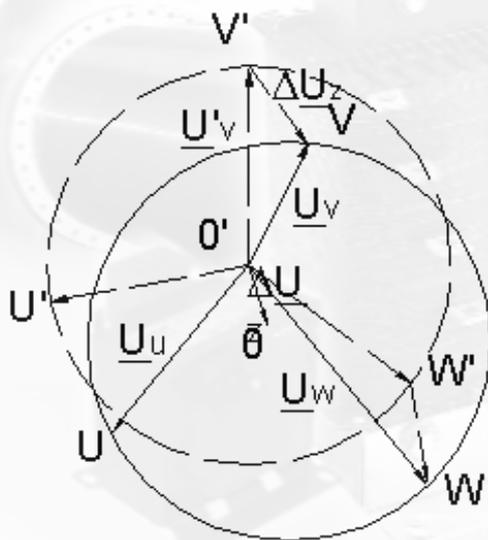


Bild 3.2.7: Sternpunktverschiebung bei einsträngiger Belastung

3.2.2.5 Sternschaltung mit Ausgleichswicklung.

Führt man den Transformator bei primärer und sekundärer Sternschaltung mit einer zusätzlichen Dreieckswicklung (Bild 3.2.8) aus, so ist eine Kompensation der Lastdurchflutung auch bei einsträngigem Sekundärstrom möglich.

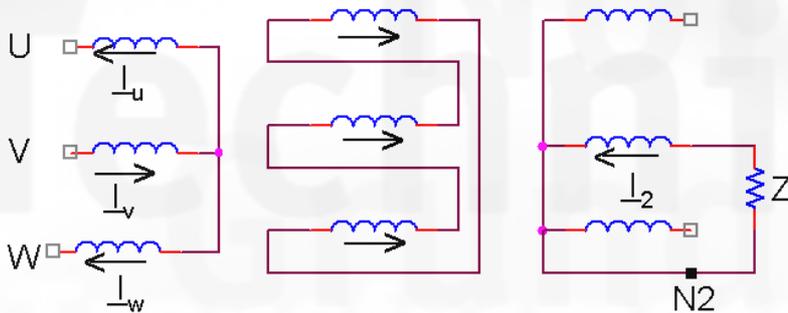


Bild 3.2.8: Einsträngige Belastung in Schaltgruppe Yyn mit Ausgleichswicklung

Die Ausgleichswicklung führt den zuvor nicht kompensierten Anteil $I'_3 = I'_2 / 3$ als Kreisstrom. Für den belasteten Strang z.B. gilt die Durchflutungsgleichung der Lastströme

$$\Theta_V = N_1 (I'_2 - I'_3 - I_V) = N_1 (I'_2 - \frac{1}{3} I'_2 - \frac{2}{3} I'_2) = 0$$

Die Belastung des sekundären Sternpunktleiters führt damit bei Stern-Sternschaltung mit Ausgleichswicklung nicht zu einer Sternpunktverschiebung.

3.2.2.6 Dreieck-Sternschaltung.

Nach Bild 3.2.9 erkennt man, dass die Sternpunktbelastung keine Störung des magnetischen Gleichgewichtes hervorruft, da auch auf der Primärseite nur der belastete Strang Strom führt.

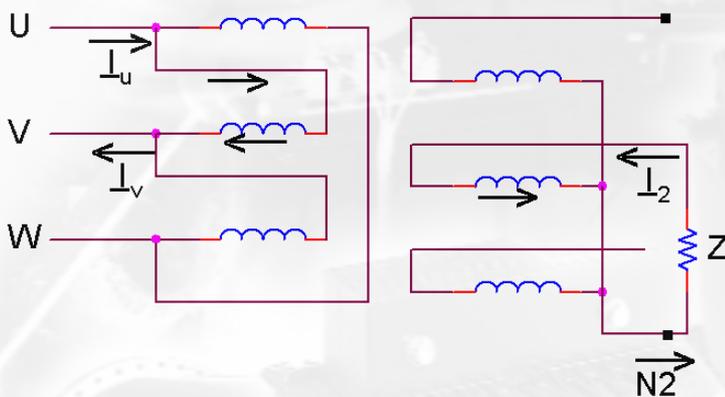


Bild 3.2.9: Einsträngige Belastung in Schaltgruppe Dyn

3.2.2.7 Stern-Zickzackschaltung.

Hier wird nach Bild 3.2.10 die Sekundärwicklung jeweils hälftig auf zwei Kerne verteilt, so dass ein einsträngiger Laststrom I_2 entsprechend magnetisiert. Fließt I_2 z.B. in den Strangwicklungen V und W , so kann dieser jetzt primärseitig durch I_V und I_W voll kompensiert werden.

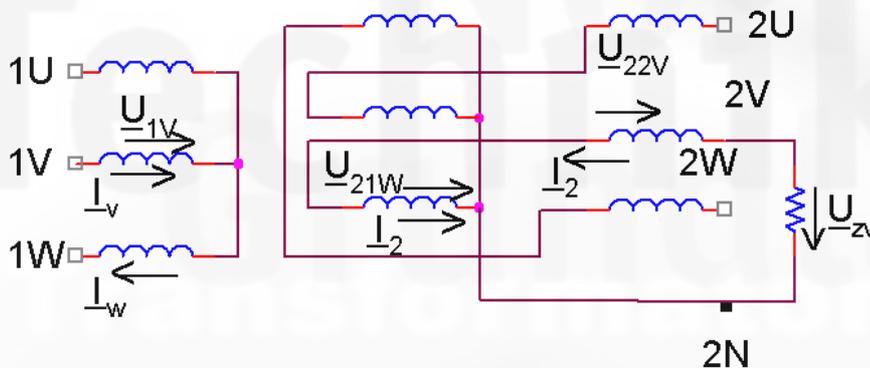


Bild 3.2.10: Einsträngige Belastung in Schaltung Yzn

Die Konstruktion der Spannungsdiagramme mit den in Bild 3.2.10 definierten Zählpfeilen für die drei Zeiger eines Strangs ergibt Bild 3.2.10.

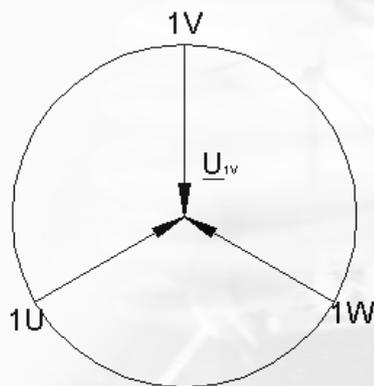


Bild 3.2.11: Spannungsdiagramme bei Schaltgruppe Yzn5

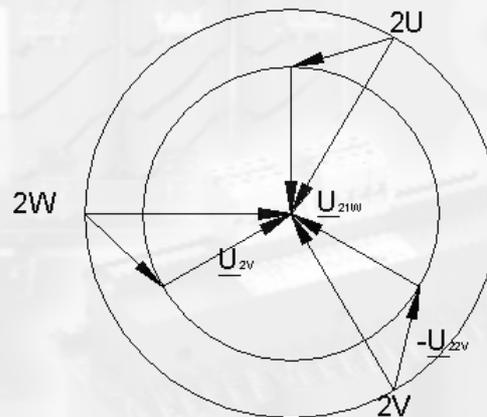


Bild 3.2.12: Einsträngige Belastung in Schaltgruppe Yzn

Durch die Phasenverschiebung der zwei Teilzeiger U_{21} und U_{22} entsteht eine Minderung der Wicklungsausnutzung im Bezug auf die Höhe der Sekundärspannung.

Ist N_2 die gesamte sekundäre Windungszahl pro Kern, so gilt für die Beziehung

$$U_2 = U_1 \cdot \sqrt{3}/2 \cdot N_2 / N_1$$

3.2.3 Auswahl der Schaltgruppen.

Die Zulässigkeit einer einsträngigen Belastung von Drehstromtransformatoren verschiedener Schaltgruppen ist in VDE0532, Teil 10 entsprechend den obigen Ergebnissen geregelt. Danach dürfen Transformatoren in Stern-Sternschaltung ohne Ausgleichwicklung in den Bauarten als Mantel- und als Fünfschenkelkern sowie als Transformatorenbank nicht und Dreischenkeltransformatoren nur bis 10% des Bemessungsstromes einphasig belastet werden. Bei allen übrigen Schaltungen ist eine Sternpunktsbelastung bis zum vollen Strom zulässig.