

Auslegung eines Querregeltransformators zur Leistungssteuerung

Dipl.-Ing. Axel Holst*, Dr.-Ing. Torsten Haase*

* Universität Rostock, Institut für Elektrische Energietechnik, A.-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock, axel.holst@uni-rostock.de, torsten.haase@uni-rostock.de

1. Einleitung

In bestimmten vermaschten Strukturen von Energieversorgungs- und Übertragungsnetzen besteht zuweilen die Forderung nach gezielter Übertragung von Wirkleistung. Gründe dieser Anforderung können einerseits technische oder wirtschaftliche Aspekte wie der Schutz vor Überlastung von Betriebsmitteln bzw. die Verlustminimierung sein. Andererseits können handels- und bilanztechnische Aspekte wie beispielsweise die Vermeidung der Nutzung von verbundenen Netzen Dritter eine Rolle spielen.

Ohne gezielten Eingriff mit lastflusssteuernden Elementen ist der Lastfluss vermaschter Netze weitgehend von den Leitungsimpedanzen abhängig und lediglich grob, etwa durch die Minderung oder Erhöhung der Einspeisung in verschiedenen Netzknotenpunkten, einstellbar.

Eine Möglichkeit zur gestuften Lastflusssteuerung stellt der Transformator mit Querregelfunktion dar. Dabei wird dem Spannungszeiger der Primär- bzw. Sekundärseite eines Netzkuppeltransformators eine Zusatzspannung beigefügt, die rechtwinklig zu diesem liegt. Die Einstellung der Wirkleistung erfolgt mittels geregelter Stufensteller, der die jeweils erforderliche Zusatzspannung auswählt. Weitere Möglichkeiten zur stufenlosen Wirkleistungsregelung stellen FACTS (Flexible AC Transmission System) in Form einer HGÜ-Kurzkupplung oder eines universellen Lastflussreglers (UPFC – Unified Power Flow Controller) dar. Diese basieren auf einem vergleichbaren Prinzip wie der Querregeltransformator, jedoch in leistungselektronischer Umsetzung. Die Gefahr bei Lastflusssteuerung in vermaschten Netzen können Ringflüsse sein, die zu erhöhten Netzverlusten und Betriebsmittelauslastungen führen.

In diesem Beitrag werden am Beispiel einer praktischen Anforderung eines Industrienetzes auslegungstechnische Untersuchungen eines Transformators mit Wirkleistungsregelfunktion für eine gegebene Netzstruktur vorgestellt.

2. Aufbau und Wirkungsweise von Querregeltransformatoren

Das Spannungs-Übersetzungsverhältnis \underline{u} von Transformatoren ist definiert durch den Quotienten der Nennspannungen von Ober- und Unterspannungsseite bzw. Primär- und Sekundärseite. Es ist eine komplexe Größe, wobei der Winkel von \underline{u} zunächst durch die Schaltgruppe festgelegt ist.

$$\underline{u} = \underline{U}_{1N} / \underline{U}_{2N} = \dot{u} \cdot e^{j\varphi_{\dot{u}}} \quad (1)$$

Der Winkel $\varphi_{\dot{u}}$ ist dabei entsprechend der Schaltung von Primär- und Sekundärwicklungen ein Vielfaches von 30° .

Transformatoren mit in Längsrichtung veränderbaren Spannungszeigern (Zusatzspannung 0° bzw. 180°) werden neben ihrer Aufgabe zur Energieumwandlung in andere Spannungsebenen zusätzlich zur Einstellung der Spannung bzw. in vermaschten Netzen gleichermaßen zur gezielten Übertragung von Blindleistung eingesetzt. Es wird hier bei feststehendem Winkel der Spannungsübersetzung die Länge eines Spannungszeigers (in der Regel des der Oberspannungsseite) eingestellt. Diese Maßnahme dient hauptsächlich der Kompensation von lastbedingten Längsspannungsabfällen.

Transformatoren mit in Querrichtung verstellbaren Spannungszeigern (Zusatzspannung 90° bzw. -90°) verändern hauptsächlich den Winkel des Spannungsübersetzungsverhältnisses. Die Sekundärspannung ändert dabei ihre Phasenlage bezüglich der Primärspannung und „erzwingt“ damit in Netzmaschen oder gekoppelten Netzen einen Leistungsfluss durch den Transformator.

Aus konstruktiven und ökonomischen Gründen kann die Zusatzspannung abweichend in Schrägrichtung ausgelegt werden. In diesem Fall spricht man von Schrägregelung (übliche $u_{\text{zus}} \pm 60^\circ, \pm 120^\circ$). Ebenso sind auch eine separate Längs- und Querregelung möglich. Die Zusatzspannung setzt sich dabei aus einer Komponente in Längs- und einer Komponente in Querrichtung zusammen.

$$u_{\text{zus L}} = u_{\text{zus}} \cdot \cos \varphi_{\text{uzus}}, \quad u_{\text{zus Q}} = u_{\text{zus}} \cdot \sin \varphi_{\text{uzus}} \quad (2, 3)$$

Praktisch ist eine Längsverstellung durch die Änderung der Anzapfung der Hauptwicklungen oder von Zusatzwicklungen möglich. Bei Quer- oder Schrägverstellung ist eine Anzapfung von Zusatzwicklungen oder Sekundärwicklungen von durch Zusatzwicklungen erregten Zusatztransformatoren erforderlich. Gemäß dieser konstruktiven Auslegung unterscheidet man zwischen Einzelkern- und Zweikerntransformatoren und bezüglich der Spulenauslegung zwischen

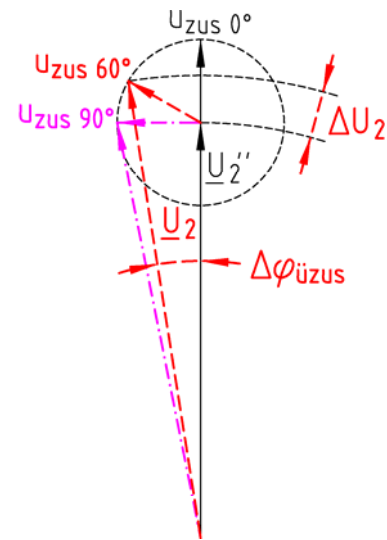


Abb. 1: Zeigerbild für Quer- bzw. Schrägregelung

symmetrisch und asymmetrisch angeordneter Zusatzspannung. Stufenbereiche bis ± 17 Stufen sind üblich.

Die Länge des Zusatzspannungszeigers wird als prozentualer Anteil des unveränderten Spannungszeigers (\underline{U}_2 in Abb. 1) pro Stufe angegeben. Das Gesamtübersetzungsverhältnis des Transformators mit Stelleinrichtung ergibt sich zu:

$$\underline{u}' = \underline{u} \cdot \underline{u}_{\text{zus}} = \underline{u} \cdot \underline{u}_{\text{zus}} \cdot e^{j(\varphi_{\underline{u}} - \varphi_{\underline{u}_{\text{zus}}})} = \underline{u}' \cdot e^{j\varphi_{\underline{u}'}} \quad (4)$$

Zunächst werden zum Verständnis der Grundlagen die allgemeinen Beziehungen und Auslegungskenngrößen eines Querregeltransformators in einem stark vereinfachten Beispielnetz angegeben.

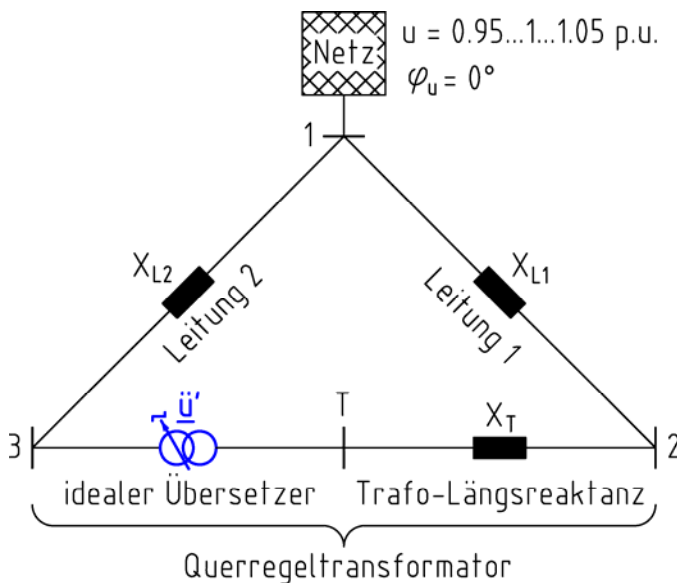


Abb. 2: vereinfachtes Beispielnetz mit Querregeltransformator

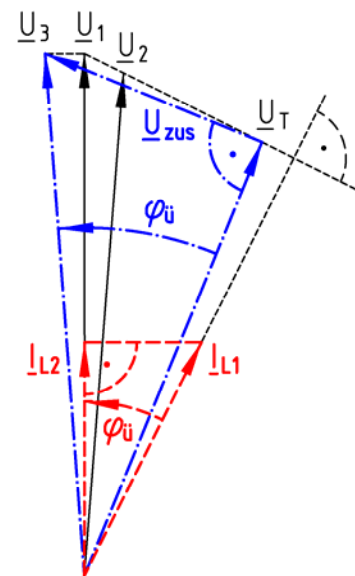


Abb. 3: Zeigerbild des Beispielnetzes mit $u_{\text{zus} Q} = 50\%$

Der vorgesehene Transformator soll in einem niederohmigen Netzring gemäß Abb. 2 den Lastfluss steuern. Es sind hier außer dem starren Netz keine Einspeiser und Verbraucher vorhanden. Den Leitungen ist jeweils eine Längsreaktanz X_{L1} und X_{L2} zugeordnet. Der Transformator, modelliert durch seine als konstant angenommene Längsreaktanz X_T und einen idealen Übersetzer mit dem Übersetzungsverhältnis \underline{u}' , ist primär- und sekundärseitig auf die Nennspannung ausgelegt und durch die Schaltgruppe $Yy0$ gekennzeichnet. Dadurch reduziert sich das Gesamtübersetzungsverhältnis für diesen Fall nach Gleichung (4) zu: $\underline{u}' = 1 \cdot e^{j0^\circ} \cdot \underline{u}_{\text{zus}} \cdot e^{-j\varphi_{\underline{u}_{\text{zus}}}} = \underline{u}_{\text{zus}}$.

Wird keine Zusatzspannung zum sekundären bzw. primären Spannungszeiger addiert, fließen keine Ströme. Die Spannungszeiger an allen Netzpunkten entsprechen der Slackspannung des starren Netzes an Sammelschiene 1.

Nun wird der Sekundärwicklung des Transformators eine Zusatzspannung in Querrichtung (90°) $u_{\text{zus}} = 50\%$ hinzugefügt. Es stellt sich ein erzwungener Wirkleistungs-Lastfluss in Uhrzeiger-Richtung (Sammelschiene 1 - 2 - 3 - 1) ein. Da in dem Kreis keine ohmschen Anteile enthalten sind, ist die umgesetzte Wirkleistung gleich Null. Das starre Netz deckt lediglich den durch den Wirkleistungs-Ringfluss verursachten Blindleistungsbedarf der im Kreis enthaltenen Längsreaktanzen, einschliesslich den des Transformators.

Abbildung 3 zeigt das Zeigerbild für diesen Fall. Das komplexe Übersetzungsverhältnis $\underline{u}_{\text{zus}}$ legt den Spannungswinkel über dem idealen Übersetzer mit $\underline{U}_T = \underline{U}_3 \cdot \underline{u}_{\text{zus}}$ fest (blau gezeichnetes Spannungsdreieck). Der Ringstrom wird mit $\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{L2} / \underline{u}_{\text{zus}}^*$ übersetzt (rot gezeichnetes Stromdreieck). Der Lastfluss stellt sich dabei so ein, dass die geometrische Summe aller Längsspannungsabfälle gerade die Zusatzspannung kompensiert. Aufgrund der geringeren Leitungsreaktanzen sind die Spannungswinkel über den Leitungen klein gegenüber dem Spannungswinkel über der Transformator-Längsreaktanz.

Für die in der Netzmasche mit $X_T \gg X_L$ übertragenen Wirkleistung folgt aus:

$$P_{\dot{u}} = 3 \frac{U_1 \cdot U_T}{X_T} \cdot \sin \varphi_u \quad (5) \quad \rightarrow \quad P_{\dot{u}} = \frac{U_{1N}^2 \cdot \dot{u}_{\text{zus}}^2}{X_T} \cdot u_{\text{zus} Q} \quad (6)$$

, und in Analogie für die übertragene Blindleistung:

$$Q_{\dot{u}} = 3 \frac{U_1 \cdot U_T}{X_T} \cdot \cos \varphi_u - 3 \frac{U_T^2}{X_T} \quad (7) \quad \rightarrow \quad Q_{\dot{u}} = \frac{U_{1N}^2 \cdot \dot{u}_{\text{zus}}^2}{X_T} \cdot u_{\text{zus} L} \quad (8)$$

Die übertragene Wirkleistung $P_{\dot{u}}$ ist also für kleine Zusatzspannungen fast linear abhängig von der Zusatzspannung in Querrichtung, die übertragene Blindleistung von der Zusatzspannung in Längsrichtung ($P_{\dot{u}} \approx k \cdot u_{\text{zus} Q}$, $Q_{\dot{u}} \approx k \cdot u_{\text{zus} L}$). Für die Auslegung der Zusatzspannung ist neben der Netzspannung die Längsreaktanz des Querregeltransformators maßgebend.

2. Auslegung eines Regeltransformators für ein Industrienetz

Es ist ein 230-kV-Ringnetz bestehend aus EVU-Sammelschiene, Kraftwerkssammelschiene und Verbrauchersammelschiene gegeben (siehe Lastflussbild Abb. 6). Um den Verbraucher direkt aus dem Kraftwerk zu versorgen und das EVU-Netz dabei minimal zu belasten, soll ein angepasster Querregeltransformator eingefügt werden. Mit Hilfe der oben aufgeführten Gleichungen lassen sich zunächst grobe Auslegungskriterien festlegen. Soll die gewünschte Wirkleistung von 100 MW innerhalb eines Spannungstoleranzbereiches $u = 0.95 \dots 1.05$ p.u. übertragen werden können, lässt sich bei Kenntnis der Transformator-Längsreaktanz die erforderliche Zusatzspannung in Querrichtung iterativ aus Gleichung (6) und durch Lastflussrechnung berechnen.

Da die Kenngrößen des Transformators jedoch erst nach Auslegung durch den Hersteller exakt bekannt sind, muss die Auslegungs-Zusatzspannung als Funktion der Transformator-Längsreaktanz angegeben werden. Dieser Zusammenhang ist in Bild 4 für die Übertragungsleistung von 100 MW / 0 MW für die Nenn- und Grenzspannungen dargestellt.

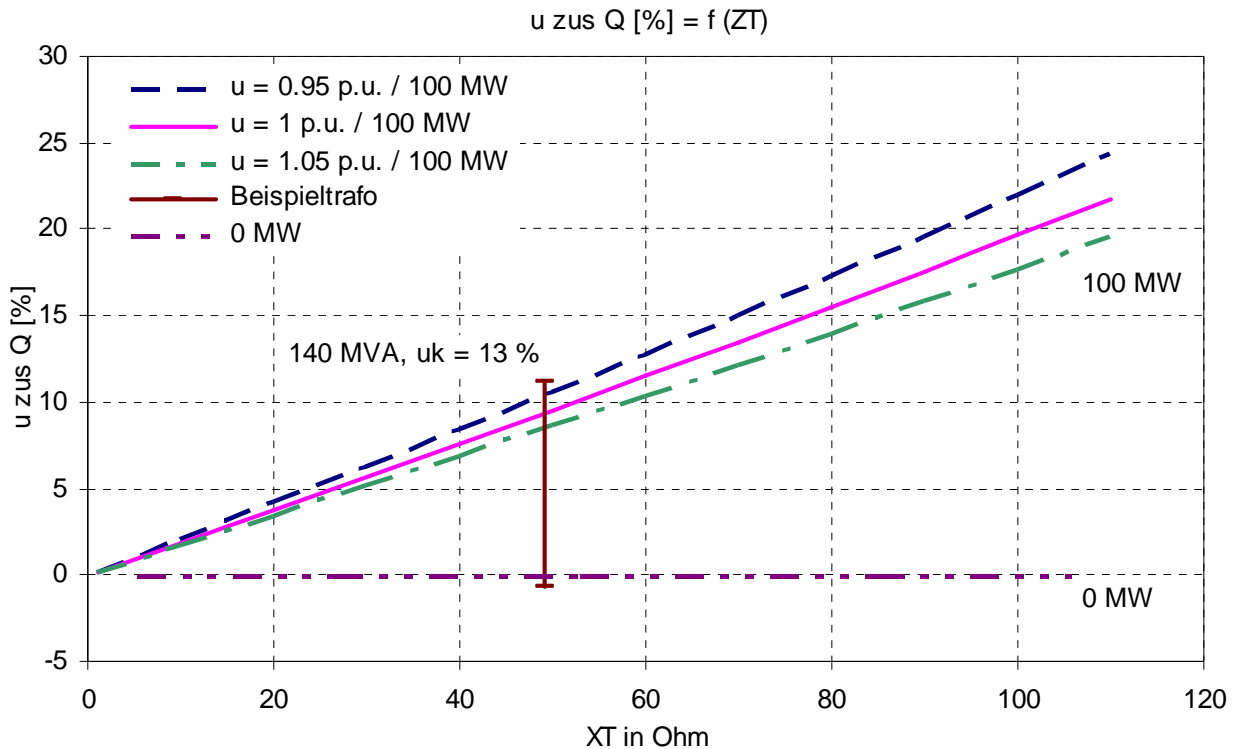


Abb. 4: Zusatzspannung in Querrichtung als Funktion der Transformator-Längsreaktanz für Übertragungsleistungen von 100 MW und 0 MW im Auslegungsfall

Ersichtlich wird, dass um eine Übertragungsleistung von 0 MW garantieren zu können, auch eine geringe negative Zusatzspannung erforderlich ist. Wird keine Zusatzspannung eingefügt, stellt sich ein Wirkleistungsfluss von etwa 1 MW in Richtung Kraftwerk - Kunde ein.

Der Verschiebungsfaktor der Last ist mit $\cos \varphi = 0,8$ induktiv angegeben. Um auch die geforderte Blindleistung zur Verfügung stellen zu können ist ein Schrägregeltransformator mit $\varphi_{\text{uzus}} = 60^\circ$ am besten geeignet. Der $(\cos \varphi)_\text{ü}$ der Übertragung beträgt hier $\sin 60^\circ = 0,866$.

Mit diesen Angaben ist es jetzt möglich, ein konkretes Beispiel für einen Transformator auszuwählen und diesen exemplarisch zu untersuchen. Dazu wurde ein Volltransformator mit $u_K = 13 \%$ (konstant angenommen) und Stufensteller an der Sekundärseite (Kunde) mit folgenden Daten gewählt:

S_N in MVA	U_{N1} in kV	U_{N2} in kV	$P_{V Cu}$ in kW	SG	Stufen	$u_{\text{zus pro Stufe}}$	φ_{uzus}	i_{leer} in %	$P_{V FE}$ in kW
140	230	230	500	YY0	-1...26	0,5 %	60°	0,4	150

Tabelle 1: Kenngrößen des Beispieltransformators

Abbildung 5 zeigt die Wirk- und Blindleistungs-Regelcharakteristik des Beispieltransformators. Die Werte gelten jeweils für den Nennbetrieb von Last und Kraftwerk. Für andere Lastzustände weichen die Ergebnisse nur sehr geringfügig ab.

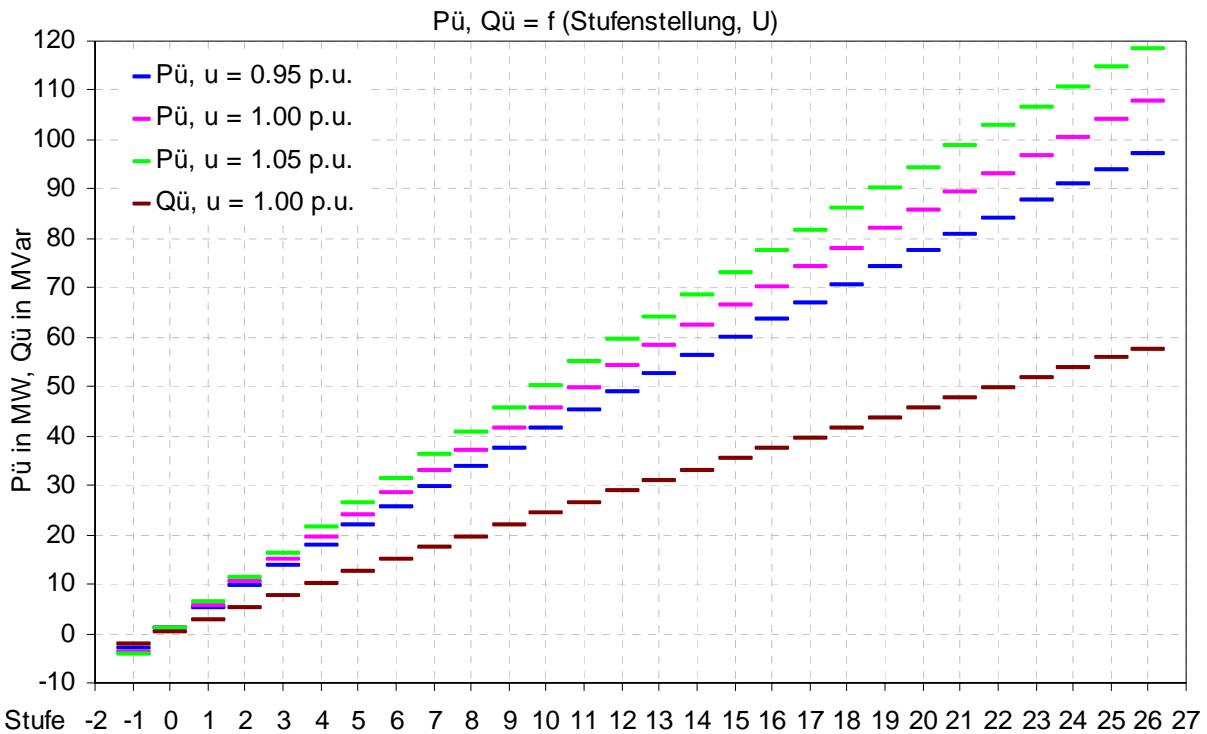


Abb. 5: Übertragene Wirkleistung $P_{\ddot{u}}$ in Abhängigkeit von der Stufenstellerposition für den Beispieltransformator im Industrienetz

Die Wirkleistungsdifferenz pro Stufe liegt bei der gewählten Stufenzahl zwischen 3,2 MW und 4,2 MW. Damit ist bei Nennbetrieb und bei Nennspannung sowie einem übertragbaren Wirkleistungsband von 0 bis 100 MW eine maximale Abweichung von 2,1 MW vom Sollwert möglich.

Bei der Darstellung der Wirkleistungen in Abb. 5 wird weiterhin ersichtlich, daß eine deutliche Abhängigkeit von der Netzspannung gemäß Gleichung (6) $P_{\ddot{u}} \sim U_{IN}^2$ besteht. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass sich die Netzspannung im ungestörten Betrieb in dem zugrunde gelegten Spannungsband befindet. Wenn es die Einspeisebedingungen des Kraftwerkes zulassen, ist über eine Spannungsregelung des Kraftwerkes (gemäß den möglichen Blindleistungsgrenzen) an der 230-kV-Kraftwerks-Sammelschiene eine Veränderung der Primärspannung des Schrägregeltransformators möglich. Damit ergibt sich eine Möglichkeit zur Feineinstellung der gewünschten Übertragungsleistung. Ab Stufe 5 ist damit bei einer Spannungstoleranz von 5 % eine stufenlose Wirkleistungseinstellung möglich.

3. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde gezeigt, welche Kriterien für die Auslegung eines Transformators mit Wirkleistungsregelung ausschlaggebend sind. Dazu

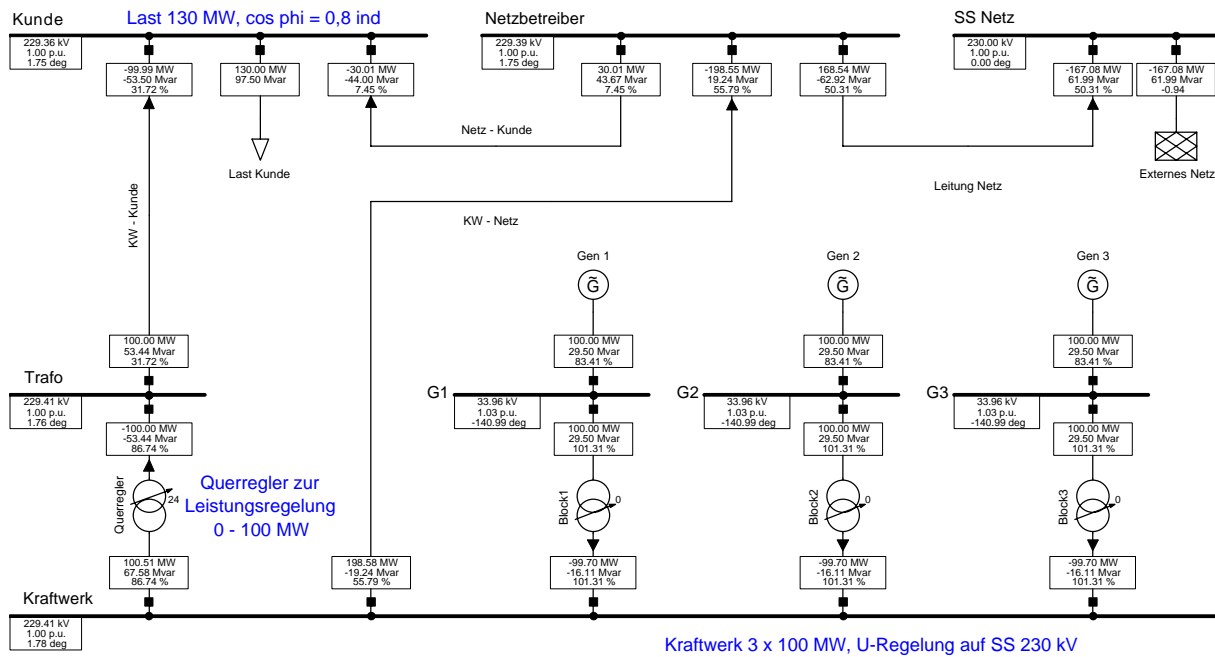


Abb. 6: Lastflussbild des Industrienetzes mit einer Übertragungsleistung von exakt 100 MW mit Feinregelung durch den Kraftwerks-Spannungsregler

wurden nach Darlegung der Grundlagen am Beispiel eines Industrienetzes die erforderlichen Zusatzspannungen ermittelt.

Die Höhe der Zusatzspannung in Querrichtung ist abhängig von der Transformator-Längsreaktanz. Die Feinregelung der Übertragungsleistung kann über eine Spannungsregelung durch das versorgende Kraftwerk erfolgen. Die Feinstufigkeit der zu übertragenen Wirkleistung ist abhängig von der Stufenzahl des Stufenstellers. Höhere Stufenzahlen erhöhen jedoch Kosten und Ausregelzeit. Soll auch eine zu übertragene Wirkleistung von 0 MW garantiert werden, ist auch eine geringe negative Zusatzspannung erforderlich.

Aufgrund der vorgegebenen Charakteristik des Verbrauchers ist ein Schrägregeltransformator mit $\varphi_{uzus} = 60^\circ$ am besten geeignet, da dieser die gleichzeitige Versorgung des Kunden mit der benötigten Blindleistung ermöglicht. Grundsätzlich sind für diese Aufgabe der Leistungssteuerung Volltransformator oder auch Spartransformator denkbar. Aufgrund der höheren Längsimpedanz ist die zu übertragene Leistung beim Volltransformator weniger von äußeren Einflüssen des Netzes abhängig. Letztendlich sind bei der Spezifikation auch ökonomische Aspekte in Betracht zu ziehen.

Die sich aus der geringen Längsimpedanz des Spartransformators ergebenden geringen benötigten Zusatzspannungen könnten zudem möglicherweise an konstruktionsbedingte Grenzen kommen. Dazu ist eine konkrete Herstellerkonsultation erforderlich.

4. Literatur

Crastan, Valentin: Elektrische Energieversorgung 2, Springer-Verlag Berlin, 2004