

Info-Brief Nr. 7

Lastabhängige Spannungsänderung

Für die Regelung der Spannung U_{Last} auf einen vorgegebenen Wert am festgelegten Lastpunkt (z.B. Ende einer Stickleitung) muss die lastabhängige Differenz zwischen der Spannung am Stufentransformator und der Spannung am Lastpunkt durch eine entsprechende automatische Änderung des Sollwertes des Spannungsreglers ausgeglichen werden, um die Spannung am Lastpunkt unabhängig von Lastschwankungen konstant zu halten.

$$U_{\text{sollt2}} = U_{\text{sollt1}} + U_{\text{komp}}$$

U_{komp} : Differenz der Effektivwerte von U_T und U_{Last}

Spannungsfall an einer Drehstromleitung

Für Hochspannungsleitungen in der Energietechnik können zur Ermittlung der Spannungsdifferenz zwischen Anfang und Ende einer Leitung anstelle der allgemeinen Leitungsgleichungen einfache Näherungsformeln verwendet werden, denen die Ersatzschaltung nach Bild 1 zugrunde liegt. Die Ergebnisse genügen den Genauigkeitsanforderungen der Spannungsregelung, die ohnehin nur stufig durchgeführt werden kann.

Die Vereinfachung der allgemeinen Leitungsgleichungen ist bei Starkstromleitungen möglich, weil deren Längen immer „kurz gegenüber der Wellenlänge λ “ der Grundschwingung der Betriebsspannung sind (λ etwa 6000 km bei 50 Hz). Als Grenzwerte für die nachfolgend genannten Näherungsformeln gelten Leitungslängen von etwa 150 km bei Freileitungen und etwa 50 km bei Kabeln.

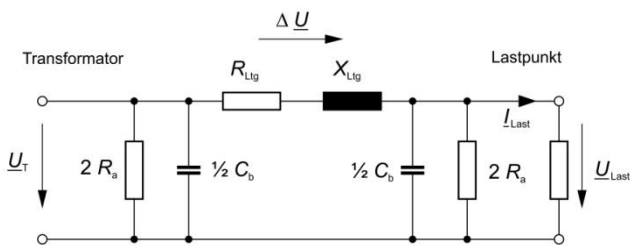


Bild 1 Ersatzschaltung der elektrisch kurzen Leitung (π -Schema, Drehstrom-Freileitung einphasig).

Für die lastabhängige Spannungsdifferenz (Leiter-Sternpunkt-Spannung) auf der Drehstromleitung zwischen dem Stufentransformator und dem Lastpunkt gilt:

$$\Delta U = U_T - U_{\text{Last}} = Z_{\text{Ltg}} I_{\text{Last}} = \Delta U e^{j(\varphi_{Z_{\text{Ltg}}} + \varphi_{I_{\text{Last}}})}$$

- I_{Last} von der Verbraucherschaltung am Lastpunkt aufgenommener Strom
- $\varphi_{Z_{\text{Ltg}}}$ Winkel der Leitungsimpedanz Z_{Ltg}
- $\varphi_{I_{\text{Last}}}$ Winkel des Stromes I_{Last} am Lastpunkt ($\varphi_{\text{Last}} = \varphi_{U_{\text{Last}}} - \varphi_{I_{\text{Last}}}$)

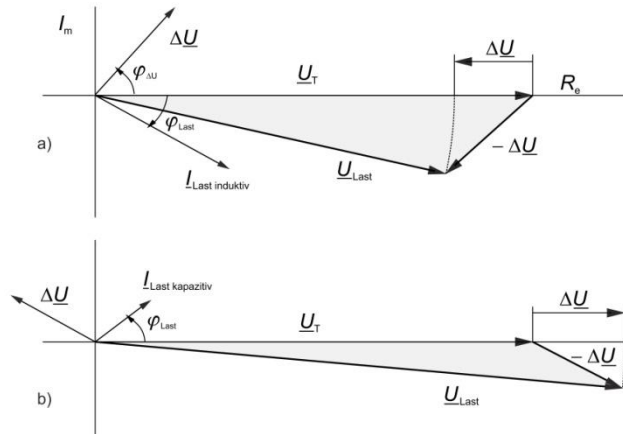


Bild 2 Spannungszeiger der einphasigen Ersatzschaltung einer elektrisch kurzen Leitung

- a) Bei induktiver Last ist der Spannungsfall auf der Leitung positiv und somit die Spannung U_{Last} am Lastpunkt niedriger als die Spannung U_T am Transformator.
- b) Bei kapazitiver Last gilt das Umgekehrte, d.h., die Spannung am Lastpunkt ist höher als am Transformator. Derartige Lasten treten z.B. vorwiegend nachts auf.

Leitungsnachbildung

Weil der Istwert der Spannung an der Last normalerweise am Spannungsregler nicht verfügbar ist, wird der Spannungsfall auf der Leitung in einer Leitungsnachbildung aus R_{Ltg} und X_{Ltg} , die vom Strom $I = I_{\text{Last}} (w_2 / w_1)$ durchflossen wird, angenähert ermittelt. Der Ableitwiderstand und die Betriebskapazität der Ersatzschaltung werden nicht berücksichtigt und die geringe Differenz zwischen den Winkeln am Anfang und am Ende der Leitung (Transformator und Lastpunkt) werden ebenfalls vernachlässigt.

Lastabhängiger Spannungsfall

Bei der Längsregelung ist für die Änderung des Sollwertes ausschließlich die Differenz der Effektivwerte von Transformatorspannung und Lastspannung maßgebend, sodass die Winkel der beiden Spannungen in diesem Zusammenhang bedeutungslos sind. Die an der Leitungsnachbildung (der Impedanz der Leitung) ermittelte komplexe Spannungsdifferenz ΔU ist jedoch verschieden von der Differenz der beiden Effektivwerte, sodass sich die komplexe Spannungsdifferenz nicht direkt zur Änderung des Sollwertes verwenden lässt.

Wir regeln das.

Für die Ermittlung der für die Spannungskompensation erforderlichen Größe $U_{\text{komp}} = |U_T| - |U_{\text{Last}}|$ muss deshalb die nicht direkt messbare Spannung an der Last aus $\underline{U}_{\text{Last}} = \underline{U}_T - \Delta \underline{U}$ berechnet werden. - Die prinzipiellen Zusammenhänge sind in Bild 3 dargestellt.

Die als „Längsspannung“ (Leiter-Sternpunkt-Spannung) bezeichnete Größe hat nahezu den gleichen Betrag wie die Spannung U_{komp} .

$$U_{\text{komp}} \approx U_{\text{längsLtg}} = I_{\text{Last}} \left(R_{\text{Ltg}} \cos \varphi_{\text{Last}} \pm X_{\text{Ltg}} \sin \varphi_{\text{Last}} \right)$$

Das Vorzeichen von $X_{\text{Ltg}} \sin \varphi_{\text{Last}}$ ist bei voreilendem Strom negativ und bei nacheilendem Strom positiv.

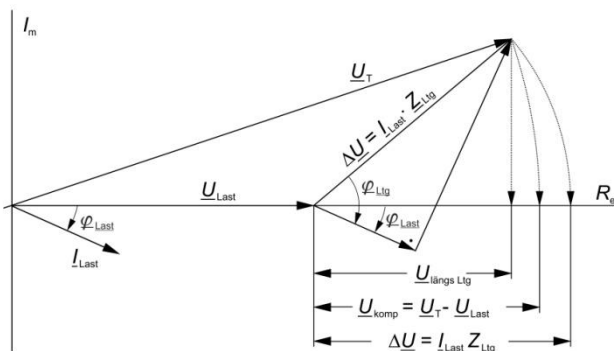


Bild 3 Vergleich der Größen ΔU , U_{komp} und $U_{\text{längsLtg}}$ (bei induktiver Last)

Beispiel 1

Leitung 10 km; $Z_{\text{Ltg}} = 4 e^{j60^\circ} \Omega$ ($R_{\text{Ltg}} = 2,0 \Omega$; $X_{\text{Ltg}} = 3,5 \Omega$);
 $U_T = 20 e^{j0^\circ} \text{ kV}$; $\Delta I_{\text{Last}} = I_{\text{Lastmax}} - I_{\text{Lastmin}} = 200 \text{ A}$;

Welchen Betrag hat die Spannung U_{Last} am Lastpunkt bei verschiedenen Winkeln des Laststromes (gegen die reelle Achse Re)?

Welche Werte ergeben sich für U_{komp} bei Änderung des $\cos \varphi_{\text{last}}$ und der Lastart?

Ergebnisse (Berechnung mit Programm E-2.5.1)

$\cos \varphi_{\text{Last}}$	0,80 ind.	0,90 ind.	0,90 kap.	0,80 kap.
Winkel $\varphi_{I_{\text{Last}}}$	-37°	-26°	+26°	+37°
$\varphi_{Z_{\text{Ltg}}}$	+60°	+60°	+60°	+60°
$\varphi_{\Delta U} = \varphi_{Z_{\text{Ltg}}} + \varphi_{I_{\text{Last}}}$	+23°	+34°	+86°	+97°
$U_{\text{Last}} = I_{\text{Last}} Z_{\text{Last}}$	18726 V	18864 V	19954 V	20221 V
$\Delta U = Z_{\text{Ltg}} I_{\text{Last}}$	806 V	806 V	806 V	806 V
$U_{\text{komp}} = U_T - U_{\text{Last}}$	+744 V	+674 V	+83 V	-72 V
$U_{\text{längsLtg}}$	+740 V	+665 V	+55 V	-100 V

Um die Spannungsdifferenz zwischen Stufentransformator und Lastpunkt auszugleichen, d.h. um die Spannung am Lastpunkt auf 20 kV zu halten, muss der Sollwert im Spannungsregler um den jeweiligen Wert von U_{komp} (nicht um $|\Delta U| = 806 \text{ V}$!) geändert werden. Der Betrag von

U_{komp} ist abhängig von $\cos \varphi_{\text{Last}}$. Wählt man für die Spannungskompensation z.B. den für $\cos \varphi_{\text{Last}} = 0,90_{\text{ind}}$ zugehörigen Wert $\Delta U^* = 674 \text{ V}$, dann ist dieser Wert für andere $\cos \varphi$ -Werte der Last falsch (siehe Tabelle)!

Stromabhängige Änderung des Sollwertes

Bei nahezu gleich bleibendem Verschiebungsfaktor und ausschließlich induktiver Last kann anstelle der Spannung U_{komp} die ausschließlich vom Laststrom abhängige Größe ΔU^* verwendet werden.

Die Differenz zwischen $\Delta U = \Delta I_{\text{Last}} R_{\text{Ltg}}$ und U_{komp} muss dann durch einen Anpassungsfaktor c ausgeglichen werden.

$$\Delta U^* = \frac{U_{\text{komp}}}{\Delta U} I_{\text{Last}} R_{\text{Ltg}} = c |\Delta U|$$

Auswahlkriterien

Für die Auswahl der geeigneten Näherungsformel bzw. Korrekturgröße sind somit der Verschiebungsfaktor der Last, die Lastart und die Leitungsdaten von Bedeutung.

Die einzuhaltenden Bedingungen sind in der Tabelle angegeben.

	Korrektur des Sollwertes	
Merkmale	spannungsabhängig (Leitungsnachbildung)	stromabhängig (Ersatzwiderstand)
Leistungsdaten	genaue Werte von R und X müssen verfügbar sein	nicht verfügbar
$\cos \varphi$ der Last (am Lastpunkt)	beliebig veränderlich	nahezu gleich bleibend
Art der Last	induktiv oder kapazitiv	Ausschließlich induktiv

Spannungsfall am Transformator

Zur Ermittlung der für die Spannungsregelung erforderlichen gesamten Spannungsänderung auf einer Versorgungsstrecke kann ein Transformator als Leitungselement mit Induktivität und Wirkwiderstand betrachtet werden. Bei gleich bleibender Primärspannung sinkt infolge der Belastung die Sekundärspannung. Die Differenz zwischen den Effektivwerten bei Leerlauf und bei Belastung ist abhängig von der Sekundärstromstärke und dem zugehörigen Phasenwinkel φ_{se} und ergibt den Spannungsfall. Bei gleich bleibender Eingangsspannung ist die relative Änderung der Ausgangsspannung zwischen Leerlauf und Nennlast des Transformators direkt proportional dessen relativer Kurzschlussimpedanz.

Für die Berechnung des lastabhängigen Spannungsfalls gilt prinzipiell das Gleiche wie bei Leitungen.

Wir regeln das.

Beispiel 2

Stufentransformator	
Bemessungsspannung U_r	110 kV/21 kV
Bemessungsleistung S_r	40 MVA
Kurzschlussimpedanz z	10 % von Z_{ref}
Kurzschlussverluste $P_{V\Sigma}$	150 kW
Laststrom I_{last}	1003 A
Verschiebungsfaktor $\cos\varphi$	0,80

Berechnete Daten (Berechnung mit Programm E-2.6.1)

Bemessungsstrom I_r

$$I_r = 1443 \text{ A}$$

Kurzschlussimpedanz Z_k

$$Z_k = 0,8 \ \Omega$$

Wirkanteil z_R

$$R = 0,024 \ \Omega$$

$$z_R = 0,3 \ \% \ \text{von } Z_k$$

Kurzschlussphasenwinkel φ_k

$$\cos\varphi_k = R / Z_k = 0,03; \ \varphi_k = 88,3^\circ$$

Kurzschlussspannung U_k

$$0,8 \ \Omega \cdot 1443 \text{ A} \cdot \sqrt{3} = 2,0 \text{ kV};$$

$$u_k = (2,0 \text{ kV} / 20 \text{ kV}) 100 \% = 10 \% \ \text{von } U_r$$

und somit $z = u_k$

Klemmenspannung U_{Klemme} 19483 V

Spannungsfall ΔU

$$20000 \text{ V} - 19483 \text{ V} = 517 \text{ V}; 4,5 \% \ \text{von } 20 \text{ kV}$$

Verfasser: Helmut Karger

Die für die Beispiele verwendeten EXCEL-Programme können abgerufen werden unter:

www.a-eberle.de

(Download Center)

Die Reihe wird fortgesetzt.

Fehlende Info-Briefe liefern wir Ihnen jederzeit gerne nach.

Ausgabe: 03-2013 / I007-1-D-1-001-04.docx