

[Anschaffungswert +
kapitalisierte Verlustkosten] min
= wirtschaftlichster Transformator

Verlustbewertung bei Transformatoren – Investitionsvergleich

Die heutige Transformatoren-Technik ermöglicht es, die Ausführungen der Transformatoren in großer Variationsbreite an die bestimmten technischen Aufgaben anzupassen.

Folgende Tatsache ist besonders hervorzuheben:

Liegen mehrere Angebote verschiedener Hersteller vor, sollte außer der technischen Ausführung, der Qualität und Zuverlässigkeit des Transformators unbedingt auch die Wirtschaftlichkeit des Transformators berücksichtigt und verglichen werden. Diese Wirtschaftlichkeit wird durch den Anschaffungswert des Transformators und durch die in Betrieb auftretenden Verlustkosten bestimmt.

Um die Lösung dieser Aufgabe des Herstellers, die wirtschaftlichste Ausführung des Transformators zu finden, überhaupt zu ermöglichen, müssen von Seiten des Kunden die für die Berechnung erforderlichen Daten genannt werden. Anhand dieser Angaben kann der Transformator bestimmt und angeboten werden, der die geringsten Gesamtkosten während seiner voraussichtlichen Lebensdauer aufweist.

1. Ermittlung der Gesamtkosten

Üblicherweise werden diese Gesamtkosten für 1 Jahr errechnet. Änderungen der Betriebsverhältnisse während der voraussichtlichen Lebensdauer müssen daher berücksichtigt werden.

Die Gesamtkosten setzen sich wie folgt zusammen:

- Kapitalkosten
- Leerlaufverlustkosten
- Kurzschlussverlustkosten

Eventuelle Unterhaltskosten für den Transformator sollten bei denen der Gesamtanlage erfasst werden. Daher bleiben sie in der folgenden Betrachtung unberücksichtigt.

1.1 Kapitalkosten K_A

Die Kapitalkosten werden nach folgender Formel berechnet:

$$K_A = \frac{A \cdot r}{100} \text{ [Euro/Jahr]}$$

Dabei sind A der Anschaffungswert des Transformators in Euro und r der Tilgungsfaktor in %/Jahr.

Der Tilgungsfaktor r kann aus der Beziehung

$$r = \frac{p \cdot q^n}{q^n - 1}$$

errechnet werden.

Dabei bedeutet:

- p = Zinssatz (%/Jahr),
- $q = 1 + \frac{p}{100}$ = Zinsfaktor,
- n = Abschreibungsdauer in Jahren.

Nachstehende Tabelle enthält einige Werte für r [%/Jahr]

Zinssatz (%/Jahr)	Tilgungsfaktoren r bei einer Abschreibungsdauer von (in Jahren)			
	15	20	25	30
3	8,38	6,72	5,74	5,10
4	8,99	7,36	6,40	5,78
5	9,63	8,02	7,09	6,50
6	10,29	8,71	7,82	7,26
7	10,97	9,43	8,58	8,05
8	11,68	10,18	9,36	8,88
9	12,40	10,95	10,18	9,73
10	13,14	11,74	11,01	10,60
11	13,90	12,56	11,87	11,50
12	14,68	13,39	12,75	12,41

Dieser Tilgungsfaktor r ist also von Zinssatz und Abschreibungsdauer abhängig. Die Kapitalkosten

$$K_A = \frac{A \cdot r}{100}$$

sind demnach die jährlich gleich bleibenden Beträge, die erforderlich sind, um ein zu p % Zinssatz geliehenes Kapital A in n Jahren durch Zahlungen jeweils am Jahresende zu begleichen.

1.2 Leerlaufverlustkosten K_{P_0}

Die Leerlaufverlustkosten fallen während der gesamten Betriebszeit des Transformators an. Die jährlichen Leerlaufverlustkosten errechnen sich aus:

$$K_{P_0} = (k_L + k_a \cdot T_B) \cdot P_0 \text{ [Euro/Jahr]}$$

Dabei sind

- k_L = Leistungskosten in Euro/kW · Jahr
- k_a = Arbeitskosten in Euro/kWh
- T_B = Betriebszeit im h/Jahr (max. 8760 h/Jahr)
- P_0 = Leerlaufverluste in kW

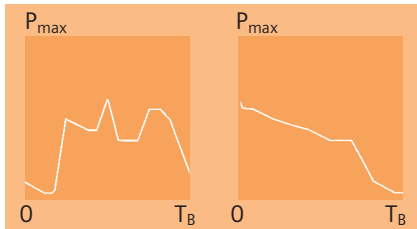
In den Leistungskosten k_L werden die Kosten für die Bereitstellung der elektrischen Leistung (Kapital- und Betriebskosten der Anlage) und die Kosten der beanspruchten Leistung berücksichtigt. Sie sind den Kunden z. B. aus dem Stromlieferungsvertrag bekannt.

1.3 Kurzschlussverlustkosten K_{P_k}

Die Kurzschlussverlustkosten sind etwas schwieriger zu erfassen, da die Kurzschlussverluste quadratisch von der Leistung abhängen und der Transformator im Laufe eines Jahres einem sehr variablen Belastungsspiel unterworfen ist. Anstelle der tatsächlichen Belastung über ein Jahr, die völlig unregelmäßig verläuft, wird die jeweilige Betriebszeit der einzelnen Leistungen zusammengefasst aufgetragen (Leistung = Ordinate, Betriebszeit = Abszisse). So erhält man die geordnete Jahresbelastungskurve.

Ein paar Begriffe müssen hier noch eingeführt werden.

Man versteht unter dem Begriff Jahresbenutzungsdauer T_m die Zeit, die der Transformator mit Höchstlast P_{max} (Wirkanteil entsprechend der geordneten Jahresbelastungskurve) betrieben werden müsste, um dieselbe Jahresarbeit A_w (Wirkanteil) zu verrichten wie bei der tatsächlichen variablen Belastung.



Links: ungeordnete, rechts: geordnete Jahresbelastungskurve. Die Flächen unterhalb der Kurven sind gleich und entsprechen der Jahresarbeit.

Das Verhältnis $\frac{T_m}{T_B}$ ist der Belastungsfaktor m (Belastungsgrad).

$$m = \frac{T_m}{T_B}; \quad m = \frac{A_w}{P_{max} \cdot T_B}$$

und daraus folgt

$$T_m = \frac{A_w}{P_{max}} \quad [\text{h/Jahr}]$$

A_w = Jahresarbeit [kWh/Jahr]

P_{max} = Spitzenwert der geordneten Jahresbelastungskurve [kW].

Dieser Wert P_{max} [kW] aus der geordneten Jahresbelastungskurve ist für die folgende Errechnung der Kurzschlusskosten in S_{max} [kVA] umzurechnen.

Spitzenwert der geordneten Jahresbelastungskurve [kVA]

$$S_{max} = \frac{P_{max} [\text{kW}]}{\cos \varphi_{max}}$$

Dazu ist die Kenntnis des $\cos \varphi$ bei Höchstlast P_{max} erforderlich.

In vielen Veröffentlichungen wird zusätzlich der Begriff Arbeitsverlustfaktor δ eingeführt, um die Kurzschlussverluste genauer zu erfassen. Dieser Arbeitsverlustfaktor δ ist vom Belastungsfaktor m abhängig. Für die hier durchzuführende Ermittlung der Kurzschlussverlustkosten ist es mit Sicherheit ausreichend, diesen Arbeitsverlustfaktor δ mit m^2 gleichzusetzen und somit für die weitere Berechnung anstelle von δ mit m^2 die Ermittlung durchzuführen. Andere Einflüsse, z. B. die Inanspruchnahme der Toleranzen der Verlustangaben oder die Erfassung des Wertes für die Höchstlast in der geordneten Jahresbelastungskurve S_{max} , ergeben größere Abweichungen als die durch diese Vereinfachung entstehende Ungenauigkeit.

Das Verhältnis

$\frac{S_{max} [\text{kVA}]}{S_N [\text{kVA}]}$ wird als relative Höchstlast h_r bezeichnet. Die Kurzschlussverluste P_k [kW] ändern sich quadratisch mit diesem Verhältnis. Dieses Verhältnis

$\frac{S_{max}}{S_N}$ kann je nach Art des Transformators (Verteilungstransformator, Netztransformator, Maschinentransformator) und Einsatzbedingungen sehr unterschiedlich sein. Auch kann sich sein Wert, insbesondere bei Verteilungstransformatoren, im Laufe der Jahre stark ändern, bei Anschaffung des Transformators kann h_r einen sehr kleinen Wert, z. B. 0,5, aufweisen, gegen Ende der Lebensdauer, je nach Einsatz, kann der Wert sogar auf über 1 ansteigen.

Bei Vorliegen dieser genannten Werte können jährliche Kurzschlussverlustkosten nach folgender Formel errechnet werden:

$$K_{P_k} = (k_L + k_a \cdot m^2 \cdot T_B) \cdot h_r^2 \cdot P_k \quad [\text{Euro/Jahr}]$$

Der Einfluss des Überlappungsfaktors ist hierbei vernachlässigt.

Ergebnis:

Die Summe dieser während eines Jahres auftretenden Gesamtkosten (Kapitalkosten K_A , Leerlaufverlustkosten K_{P_0} und Kurzschlussverlustkosten K_{P_k}) ergibt beim wirtschaftlichsten Transformator ein Minimum.

Der Vollständigkeit halber ist noch zu erwähnen, dass bei einer exakten Erfassung der Gesamtkosten auch die Kosten der Magnetisierungsblindleistung und der Hilfsbetriebe (Kühlanlagen) berücksichtigt werden müssten.

2. Kapitalwertbestimmung

Diese vorteilhafte Methode, den wirtschaftlich günstigsten Transformator zu bestimmen, wird angewandt, wenn die Bewertungen der Leerlauf- und Kurzschlussverluste bekannt sind. Ausgegangen wird hierbei ebenfalls von der Erfassung der jährlichen Gesamtkosten.

Die dort genannten jährlichen Leerlaufverlustkosten K_{P_0} werden durch den Wert P_0 dividiert, die genannten jährlichen Kurzschlussverlustkosten werden durch den Wert P_k dividiert. Dadurch erhält man die Jahreskosten der Leerlaufverluste bzw. der Kurzschlussverluste je kW, d. h. also als Formel dargestellt:

$$b_{P_0} = \frac{K_{P_0}}{P_0} = k_L + k_a \cdot T_B \quad [\text{Euro/kW} \cdot \text{Jahr}]$$

$$b_{P_k} = \frac{K_{P_k}}{P_k} = (k_L + k_a \cdot m^2 \cdot T_B) \cdot h_r^2 \quad [\text{Euro/kW} \cdot \text{Jahr}]$$

Diese Jahresverlustkosten je kW P_0 bzw. P_k werden nun mit dem Faktor $\frac{100}{r}$ multipliziert, d. h. es werden dadurch die kapitalisierten Werte der Jahresverlustkosten je kW P_0 bzw. P_k am Tag der Anschaffung des Transformators ermittelt. Dies sind die vom Betreiber angewandten Bewertungen der Leerlauf- und Kurzschlussverluste:

$$B_{P_0} = b_{P_0} \cdot \frac{100}{r} \quad [\text{Euro/kW}]$$

$$B_{P_k} = b_{P_k} \cdot \frac{100}{r} \quad [\text{Euro/kW}]$$

Da die Jahresverlustkosten durch die Multiplikation mit dem Faktor $\frac{100}{r}$ kapitalisiert worden sind, ist ein direkter Vergleich mit dem Anschaffungswert A des Transformators möglich.

Die Summe aus Anschaffungswert A des Transformators, Bewertung der Leerlaufverluste \cdot Leerlaufverlustwert und Bewertung der Kurzschlussverluste \cdot Kurzschlussverlustwert ergibt den kapitalisierten Vergleichspreis

$$K_{VG} = A + B_{P_0} \cdot P_0 + B_{P_k} \cdot P_k \text{ [Euro]}$$

Ergebnis:

Der kleinste Summenwert entspricht dem wirtschaftlichsten Transformator.

Wenn diese Bewertungen der Verluste dem Transformatorenhersteller bekannt sind, kann der Transformator verlustmäßig richtig ausgelegt werden. Der weitere Vorteil dieser Methode der Kapitalwertbestimmung liegt darin, dass bei diesen Angaben der Bewertungen keine Rückschlüsse auf die interne Kalkulation des Betreibers gezogen werden können. Diese Methode wird daher vielfach der anderen Methode, bei der die jährlich auftretenden Kosten einzeln erfasst werden, vorgezogen.

Abkürzungen und zugehörige Dimensionen

A	= Anschaffungswert des Transformators	Euro
K_A	= Kapitalkosten	$\frac{\text{Euro}}{\text{Jahr}}$
r	= Tilgungsfaktor	$\frac{\%}{\text{Jahr}}$
p	= Zinssatz	$\frac{\%}{\text{Jahr}}$
q	= Zinsfaktor	
n	= Abschreibungsdauer	Jahre
K_{P_0}	= Leerlaufverlustkosten	$\frac{\text{Euro}}{\text{Jahr}}$
K_{P_k}	= Kurzschlussverlustkosten	$\frac{\text{Euro}}{\text{Jahr}}$
k_L	= Leistungskosten	$\frac{\text{Euro}}{\text{kW} \cdot \text{Jahr}}$
k_a	= Arbeitskosten	$\frac{\text{Euro}}{\text{kWh}}$
T_B	= Betriebszeit	$\frac{\text{h}}{\text{Jahr}}$
T_m	= Jahresbenutzungsdauer	$\frac{\text{h}}{\text{Jahr}}$
m	= Belastungsfaktor	
b_{P_0}	= Jährliche Leerlaufverlustkosten je kW	$\frac{\text{Euro}}{\text{kW} \cdot \text{Jahr}}$
B_{P_0}	= Bewertung der Leerlaufverluste	$\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$
b_{P_k}	= Jährliche Kurzschlussverlustkosten je kW	$\frac{\text{Euro}}{\text{kW} \cdot \text{Jahr}}$
B_{P_k}	= Bewertung der Kurzschlussverluste	$\frac{\text{Euro}}{\text{kW}}$
K_{VG}	= Kapitalisierter Vergleichspreis	Euro
S_N	= Nennleistung	kVA
P_0	= Leerlaufverluste	kW
P_k	= Kurzschlussverluste	kW
P_{\max}	= Höchstlast (Wirkanteil) der geordneten Jahresbelastungskurve	kW
S_{\max}	= Höchstlast ($P_{\max} / \cos \varphi_{\max}$)	kVA
h_r	= Relative Höchstlast	
A_W	= Jahresarbeit (Wirkanteil)	$\frac{\text{kWh}}{\text{Jahr}}$

Siemens AG
Power Transmission
and Distribution
Transformers Division
Transformatorenwerk Kirchheim
Hegelstraße 20
73230 Kirchheim/Teck
Deutschland

www.siemens.de/ptd

Änderungen vorbehalten

Bestell-Nr. E50001-U413-A73
61D6893 100301 PA 0602X.