

Info-Brief Nr. 16

Heißpunkt-Temperatur und Lebensdauer von Transformatoren

Leistungstransformatoren sind Schlüsselkomponenten der elektrischen Versorgungsnetze.

Der Ausfall eines Transformators bringt nicht nur große wirtschaftliche Nachteile für den Energieversorger, sondern kann auch zu extremen Einbußen für die Verbraucher führen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll den Transformator möglichst gut zu überwachen, seine „Fieberkurve“ (das thermisches Abbild) aufzunehmen, um auf diese Weise Informationen über die aktuelle Belastung und die zu erwartende Restlebensdauer zu gewinnen. Diese Aufgabe lässt sich - gestützt auf IEC- Vorschriften - durch elektronische Mess- und Recheneinrichtungen lösen.

Die thermische Situation im Transformator kann grafisch dargestellt (siehe Bild 1) werden, wobei es sich um eine vereinfachte Darstellung einer komplexen Situation handelt.

Folgende Vereinfachungen sind notwendig:

- man unterstellt, dass sich die Öltemperatur im Tank linear von unten nach oben erhöht.
- als weitere Annahme gilt, dass sich die mittlere Temperatur der Wicklung ebenfalls linear parallel zur Öltemperatur mit einer konstanten Differenztemperatur g_r von unten nach oben erhöht.
- es wird angenommen, dass die Heißpunkt-Temperatur (P) höher ist, als die Temperatur der Wicklung am oberen (heißen) Ende der Wicklung. Die Temperaturerhöhung zwischen dem Heißpunkt in der Wicklung und der Öltemperatur oben im Tank wird als Konstante Hgr (Heißpunkt zu Top-Öl-Gradient) bezeichnet. Untersuchungen konnten belegen, dass der Faktor H, je nach Transformatorgröße, Kurzschlussimpedanz und Wicklungsdesign zwischen 1.0 und 2.1 variieren kann.

Die im Diagramm verwendeten Abkürzungen werden weiter unten erklärt. Gemessene Werte sind mit einem ausgefüllten Quadrat (■), errechnete Werte sind mit einem ausgefüllten Punkt (●) gekennzeichnet.

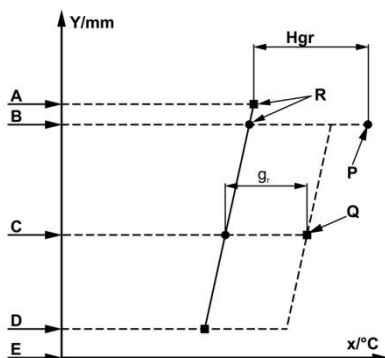


Bild 1

- A: Obere Ölschicht
- B: Oberes Ende der Wicklung
- C: Mitte der Wicklung
- D: Unteres Ende der Wicklung
- E: Repräsentiert den Boden des Tanks
- P: Heißpunkt- oder Hot-Spot-Temperatur
- Q: Durchschnittliche Wicklungstemperatur
- R: Punkte, von denen man annimmt, sie hätten gleiche Temperatur
- X: X-Achse des Diagramms zeigt die Temperatur
- Y: Y-Achse gibt die relative Lage der einzelnen Punkte an

Für die Ermittlung der Heißpunkttemperatur benötigt man neben der Öltemperatur Θ_0 einen Phasenstrom I und einige transformatorspezifische Kenngrößen.

In der Mehrzahl der Fälle wird diese Auslegung zu hinreichend guten Ergebnissen führen, weil davon ausgegangen werden darf, dass der Transformator näherungsweise gleichmäßig belastet wird.

Für diesen Betriebsfall gilt nämlich: $I_1 \sim I_2 \sim I_3$

Die Heißpunkt- oder Hot-Spot-Temperatur wird nach folgendem Modell berechnet:

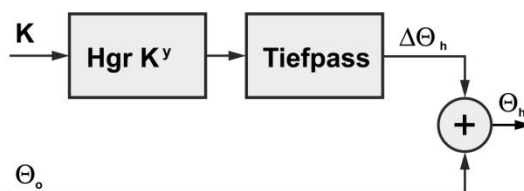


Bild 2

- K: Lastfaktor = I / I_N
- Θ_0 : Öltemperatur (gemessen)
- Hgr: Heißpunkt zu Top-Öl-Gradient
- $\Delta\Theta_h$: Hot-Spot-Temperaturerhöhung
- Θ_h : Hot-Spot Temperatur
- y: Wicklungsexponent
- Tiefpass: Abbild der Wärmekapazität des Trafos

Die Öltemperatur ist neben dem Betriebsstrom die wichtigste Messgröße für die Abschätzung bzw. Berechnung der Hot-Spot- oder Heißpunkt- Temperatur Θ_h . Die jeweils gemessene Öl-Temperatur wird zusammen mit dem Strom und den Kennwerten des Transformators in die Gleichung eingesetzt, um so ein thermisches Abbild des Transformators zu erhalten. Auf dieser Basis kann schließlich neben der Heißpunkt-Temperatur auch die Lebensdauererfahrung der Isolation berechnet werden.

Lebensdauerverbrauch

Die Information "Lebensdauerverbrauch" wird gebildet aus dem Formelwerk, das in der CEI/IEC 354 / VDE 0536 festgelegt ist.

Der Lebensdauerverbrauch darf nicht verwechselt werden mit den Betriebsstunden. Unter "Betriebsstunden" versteht man die Zeit die der Trafo unter Spannung stand, während im Lebensdauerverbrauch die thermische Alterung berücksichtigt wird.

Die relative thermische Alterung der Isolation unter Berücksichtigung von Temperatur und Zeit wird durch die Gleichung von Arrhenius bestimmt:

$$\text{Lebensdauer} = e^{(\alpha+\beta)T} \quad (1)$$

α und β Konstanten, die durch Versuche an den betreffenden Isolationsmitteln bestimmt werden
 T thermodynamische Temperatur in K

Im Temperaturbereich von 80...140°C kann das Gesetz von Arrhenius in die etwas einfachere Beziehung nach Montsinger überführt werden.

$$\text{Lebensdauer} = e^{-P\Theta} \quad (2)$$

P Konstante
 Θ Temperatur in °C

Nach wissenschaftlichen Veröffentlichungen verdoppelt sich im Bereich von 80 bis 140°C der Lebensdauerverbrauch in Transformatoren, wenn die Temperatur um etwa 6 K steigt.

Der relative Lebensdauerverbrauch bei einer Temperatur Θ_h , bezogen auf den normalen Lebensdauerverbrauch bei der Temperatur Θ_{hN} , kann nach folgender Gleichung bestimmt werden.

$$V = \frac{\text{Lebensdauerverbrauch bei } \Theta_h}{\text{Lebensdauerverbrauch bei } \Theta_{hN}} \quad (3)$$

$$V = 2^{(\Theta_h - \Theta_{hN})/6} = e^{0,693(\Theta_h - \Theta_{hN})/6}$$

Der Wert Θ_{hN} wurde für einen Transformator nach CEI/IEC 354 / VDE 0532 Teil 1/11.71 zu 98°C festgelegt. Diese Temperatur entspricht dem Betrieb eines Transformators mit Nennleistung bei 20°C Kühlmitteltemperatur, wenn die Heißpunktübertemperatur 78 K beträgt, d.h. 13 K über der mittleren Übertemperatur von 65 K liegt. Diese Temperaturbedingungen entsprechen der normalen Alterung der Isolierung.

Aus der Gleichung (3) mit $\Theta_{hN} = 98^\circ\text{C}$ kann folgende Gleichung in dekadischen Logarithmen abgeleitet werden.

$$V = \text{rel. Lebensdauerverbrauch} = 10^{(\Theta_h - 98)/19,93} \quad (4)$$

Dieser Zusammenhang ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

Θ_h in °C	relativer Lebensdauerverbrauch V
80	0,125
86	0,25
92	0,5
98	1,0
104	2,0
110	4,0
116	8,0
122	16,0
128	32,0
134	64,0
140	128,0

Beispiel:

10 h bei 104°C und 14 h bei 86°C verbrauchen
 (10 h x 2) + (14 h x 0,25) = 23,5 h

Lebensdauer während 24 h Betriebsdauer.

Man beachte, dass unterhalb von 80°C der Lebensdauerverbrauch vernachlässigbar ist.

Wenn Last und Umgebungstemperatur konstant sind, kann der relative Lebensdauerverbrauch mit Hilfe der Beziehung V-t ermittelt werden.

„t“ ist dabei die Zeit unter Last und V der relative Lebensdauerverbrauch aus Gleichung (3).

Im allgemeinen Fall - die Betriebsbedingungen sind nicht konstant - errechnet sich der Lebensdauerverbrauch des Transformators gemäß folgender Gleichung:

$$L = \frac{1}{t} \int_{t_1}^{t_2} V dt \quad \text{oder} \quad L = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V \quad (5)$$

n: Zahl eines Zeitintervalle

N: Gesamtzahl gleicher Zeitintervalle

Praxishinweis

Eine optimale Belastung wird erreicht, wenn die beiden parallel betriebenen Transformatoren mit je 75 % belastet sind. Fällt nun ein Transformator aus, kann der andere Transformator 20 min. mit 150 % belastet werden.

Die Reihe wird fortgesetzt.

Fehlende Info-Briefe liefern wir Ihnen jederzeit gerne nach.

Ausgabe: 03-2013 / I016-1-D-1-001-04.docx