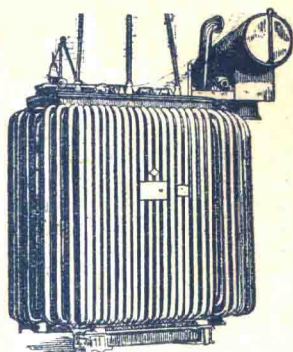


電力變壓器的 負荷能力

蘇聯勒·麥·涅澤爾著

裘益鍾 吳際舜 倪際煒譯



燃料工業出版社

電力變壓器的 負荷能力



電力工業出版社

內 容 提 要

本書闡明電力變壓器在不同的運行情況下的負荷能力問題，這些運行情況基本上是由冷卻媒質的溫度和負荷情況來決定的。

本書分析了變壓器的絕緣老化問題，並研究了油的粘度、電動機的起動電流和事故過負荷等各種因素對於絕緣損壞的影響。

本書建立了電力變壓器（油浸式和乾式）的負荷能力直線圖，以確定在不縮短其正常使用期限的條件下所容許的經常過負荷。

本書供從事變壓器設計和運行的工程師和技術員應用，並可作為大學電工系專業學生的參考書籍。

* * *

*

電力變壓器的負荷能力

НАГРУЗОЧНАЯ СПОСОБНОСТЬ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ
根據蘇聯國立動力出版社(ГОСЭНЕРГОИЗДАТ)

1953年莫斯科俄文第一版翻譯

蘇聯 Л. М. ШНИЦЕР 著

袁益鍾 吳際舜 倪際煒譯

燃料工業出版社出版

社址：北京長安街靈柩工藝師

北京市書刊出版業營業許可證出字第012號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

編輯：陳惟清 校對：趙葆玲

書號432電189 * 787 × 1092 1/2 開本 * 4 印張 * 88千字 * 印1—5,100冊

一九五五年五月北京第一版第一次印刷

定價 6 角 3 分

序 言

在蘇聯共產黨(布)第十九次代表大會關於第五個五年計劃的指令中，規定了在1951—1955年內新的偉大的發展蘇聯電氣化的擴大了的綱領。

五年計劃預計發電廠的容量將獲得高速度的發展，1955年的發電量將比1950年的發電量超過80%。

由於掌握了新的技術和改善電氣設備運行的結果，尤其是改善變壓器運行的結果，使國家節省了幾百萬噸的燃料。

同時，關於合理使用變壓器容量問題，無論在變壓器的負荷能力方面或在工作經濟狀況方面都是技術經濟運行中的最重要問題。在大多數情況中，這兩個條件不僅不互相矛盾，而且是一致的。

另一方面，應該注意到，變壓器的負荷能力與變壓器安裝地點的氣候關係很少，這點與通常的見解相反。

但在大部分工業企業中，負荷曲線的波動頗為劇烈，要在這種情形下來選擇變壓器是一件重要的事情。本書對這些問題也加以說明。

本書蒙工學博士依·阿·賽羅米亞特尼科夫和工程師斯·麥·李夫席茨給了許多寶貴的指示，著者對他們表示衷心的感謝。

著 者

目 錄

序 言

緒 論	4
-----	---

第一章 變壓器的發熱和冷却	9
---------------	---

1-1. 具有散熱的發熱和冷却過程	9
-------------------	---

A 負荷不變時的溫昇	9
------------	---

B 負荷變動時的溫昇	15
------------	----

1-2. 沒有散熱的發熱	26
--------------	----

1-3. 在週期性負荷情況下的發熱和冷却	29
----------------------	----

1-4. 根據均方根負荷法來計算發熱	32
--------------------	----

第二章 變壓器的發熱標準	36
--------------	----

第三章 絕緣的老化	40
-----------	----

3-1. 八度規則	40
-----------	----

3-2. 損壞率	45
----------	----

3-3. 標準變壓器的自然損壞率	47
------------------	----

3-4. 油的粘度對於絕緣損壞的影響	52
--------------------	----

3-5. 等值溫度	64
-----------	----

3-6. 八度規則與容量等級	66
----------------	----

3-7. 用人工方法維持低油溫時, 變壓器的容許負荷	68
----------------------------	----

第四章 經常容許的過負荷	70
--------------	----

4-1. 負荷能力直線圖	70
--------------	----

4-2. 強迫通風冷却油浸式變壓器的填滿係數	77
------------------------	----

4-3. 在開斷風扇時油浸式變壓器的運行	80
----------------------	----

4-4. 由於夏季欠負荷的冬季容許過負荷	83
----------------------	----

4-5. 按照預期的晝夜平均負荷來決定必需的額定容量	87
4-6. 由電動機起動電流所引起的容許過負荷	91
4-7. 乾式變壓器的負荷能力曲線	101
4-8. 在週期性負荷情況下變壓器所需額定容量的決定	104
4-9. 在不對稱負荷時，三相油浸式變壓器按發熱的 可能出力	112
第五章 事故過負荷	113
5-1. 事故過負荷的「犧牲值」	113
5-2. 事故過負荷的延續時間	120
5-3. 供給偶然性負荷的變壓器容量的選擇	125
結 論	126

緒 論

最近十五年來，在我們工程界的刊物上，對於有關電力變壓器負荷能力問題，有了足夠詳盡的說明。在運行人員、電氣工業界和設計部門的一系列代表會議上，對這個問題也展開了討論。但是，直到今天對於這個問題，還沒有一個統一明確的觀點。

電氣工業產品目錄上介紹了利用變壓器負荷能力直線以決定其負荷能力的方法。變壓器運行規程中指出了十分謹慎的百分之三法則。現在有些地方的某些運行人員，有時把「額定容量」和「負荷能力」的概念混為一談，採用一些措施加強變壓器的負荷能力，使其超過合理的限度。顯然，從運行的經濟觀點來看，一台按過負荷方式運行的變壓器，如果用一台有着較大額定容量的變壓器來代替，則兩者意義絕不相同。正確設計的各種類型變壓器，在容量增加時，其每仟伏安的損失將減少；反之，變壓器在過負荷時（即勉強增大其容量時），每仟伏安的損失將增加。在另一方面，某些運行人員走了極端相反的道路，他們根據晝夜平均負荷對於額定負荷之比通常在0.5—0.6範圍內波動，就認為年損失的最低值發生在變壓器的年平均負荷不超過額定容量的50—60%，而變壓器在最大負荷的幾小時內的負荷不超過額定容量的70—80%的情況下。這種說法，僅在下列情況下才是正確的，即利用係數 $\frac{I_{cp.сум}}{I_{ном}}$ 為最低，而曲線的填滿係

數 $\frac{I_{\text{ср.сум}}}{I_{\text{макс}}}$ 比較高，也就是在理論上的二階負荷曲線，其晝夜最大負荷不高於在 $T'_{\text{макс}}$ 小時內的額定負荷。

這對於具有低填滿係數的，波動得很厲害的，通常的負荷曲線是不正確的。在這些情況下，當利用係數相同時，晝夜最大負荷實際上大於額定負荷，在下面可以看到，即使在變壓器的損失比為 $\frac{P_{\kappa}}{P_{\kappa.\pi}} = 3-4$ 時，這種晝夜最大負荷還是允許的，而且經濟合理。

變壓器的額定容量和負荷能力的概念並不相同。

某一已知變壓器的額定容量只有一個數值。這個數值是某一個完全確定的容量，是變壓器在經濟合理的效率下，在整個正常使用期限內（約為 20 年）所能經常連續不斷輸出的容量。

負荷能力是變壓器僅在所認定的相當短的時間內所能輸出的容量，這個容量的數值由變壓器在所認定的時間內的運行條件而決定，或由是否損害其正常使用期限，是否增加其絕緣的自然損壞而決定。

變壓器負荷的正常方式很少是平行於時間座標軸的直線。在平常的運行情況下，特別在工業企業中，電能晝夜消費的曲線是不相等的。對晝夜平均負荷的偏差可達 $\pm(50-75)\%$ 。在同樣的情況下，為了更好地利用變壓器的額定容量，應該使其晝夜最大負荷有較小的數值。這裏所以發生變壓器的負荷能力問題是由於晝夜中某些時間內變壓器不可避免地要過負荷。因為像這類過負荷，變壓器經常每天要碰到，容許這些過負荷的必需條件，就是要不損害變壓器的正常使用期限，而且晝夜平均效率應該要不低於額定值，

甚至可能接近於最大效率。

由此可見，變壓器的額定容量應該低於最大負荷而高於晝夜平均負荷，使得晝夜平均銅損失接近於空載損失。

以後將要指出，正確的選擇變壓器並根據負荷能力直線圖所決定的數據來運行時，可能使變壓器適合所有的三個要求：

- (1) 有足夠高的額定容量的利用係數；
- (2) 效率能接近於最大效率；
- (3) 不會增加絕緣損壞。

在另一方面於事故情況下也常發生負荷能力問題。例如，並列運行變壓器組中有一台變壓器損壞，那麼這台變壓器所擔負的部分負荷，就必須分配到其他剩下來的變壓器上，使它們暫時地過負荷。在這種情形下，關於效率問題，當然是不再去考慮了。某些或大或小的損壞增加百分數由其具體情況而決定，其值與過負荷的大小和延續時間的長短（在幾小時或幾晝夜之內）有關。

顯然，過負荷不能太大，若其值能夠把過負荷的那台變壓器在最短時間內損毀，這樣的過負荷就是絕對不能容許的。因為原來想用過負荷的方法來消除事故，但其結果反而擴大了事故的範圍。

事故過負荷在容許延續時間內可超過額定值的60—70%左右。從後面可以看到，容許延續時間一般說來是用幾分鐘來表示，偶而也用幾小時來表示，但絕不會用幾晝夜來表示。

如果為了某些列為「第一級」的工業企業負荷，需要保證在10—15晝夜裏可以有60—70%的過負荷，則不用其他

變壓器作為經常的後備，而用暫時加強冷卻系統(例如洒水裝置方式)的方法來暫時地加強變壓器的負荷能力，這樣也許較為合理。

最後，在工業企業設備中由於電動機的起動電流發生變壓器的過負荷。這種過負荷是特殊的，其本身的延續時間很短暫(5—30 秒)，其數值可達 300—500%，大大地超過了延續時間相當長久的事務過負荷。不過起動過負荷重覆的次數是有規律的，因此可以設法避免超過正常的損壞。在適當的選擇變壓器額定容量與晝夜平均負荷的比值時，這個條件是可能滿足的。

為了便於敘述起見，本書的基本目的歸納如下：

1. 規定一個計算的方法，並製出變壓器的負荷能力直線圖，以便確定其無損於正常使用期限的容許經常過負荷值。

這種負荷能力直線圖應使已安裝好的變壓器有調整負荷曲線的可能。

2. 作出一適當的圖解來表示晝夜平均需量與變壓器額定容量的關係。

這種關係在設計裝置時是應該加以考慮的。

3. 說明變壓器的溫度在不同於冷卻媒質的額定溫度時的負荷能力問題(油粘度變化影響的因素考慮在內)。

4. 在各種運行情況下，製訂變壓器在事故過負荷時計算損壞的合理方法(如果經常過負荷是負荷能力直線圖所容許的，對這種損壞的計算就沒有必要了)。

5. 說明利用加強變壓器冷卻系統的方法可以增加安裝好的變壓器的容量問題。

6. 建立計算容許「起動」過負荷的方法。

因為上面所提到的問題都與變壓器的發熱及其絕緣老化問題有關，所以著者考慮用一章篇幅來計算變壓器各部分在各種正常的或事故的負荷情況下的發熱，並以目前研究所得的結果來簡單地說明絕緣老化問題和冷却媒質溫度變動問題的性質是合適的。

最後，提出與我們瞭解的主題有關的某些定義，而這些定義並不包括在變壓器的標準內。

變壓器的電流等於額定電流時，其負荷稱為變壓器的額定負荷。

在一定的時間內，變壓器電流有效值的變化的連續情況稱為變壓器的負荷情況。一定時間內的象徵着負荷情況的電流變化曲線，稱為負荷曲線。

根據負荷曲線的特性，變壓器的負荷情況可分為三種：

a)連續不變的負荷情況；

б)週期性的負荷情況；

в)變壓器的負荷作不規律變化時的不規律負荷情況。

在絕大多數的運行情況下，變壓器的負荷情況是不規律的，但是在選擇變壓器時，這種不規律負荷通常可近似地化為連續不變的或週期性的負荷的等值情況。

負荷曲線在某一段所考慮的時間 t 內的平均負荷 I_{cp} 對於最大負荷 I_{maxc} 之比稱為曲線的填滿係數 S ，即

$$S = \frac{\int_0^t I dt}{I_{maxc} t} = \frac{I_{cp}}{I_{maxc}}.$$

第一章 變壓器的發熱和冷卻

1-1. 具有散熱的發熱和冷卻過程

A. 負荷不變時的溫昇

變壓器繞組和鐵芯在運行時有能量的損失，這些損失轉變為熱。

變壓器在負荷時的溫度是高於冷卻媒質的溫度，而且開始向周圍媒質散熱。因之，變壓器溫度的增加就延緩了。同時相當於某一既定的變壓器負荷的熱流完全穩定後，變壓器的發熱停止增加，此時就達到了溫度的穩定狀態。

在一定負荷下，對周圍媒質而言的溫昇穩定值係由變壓器散熱面積的大小和散熱能力而決定。散熱面積愈大和散熱能力愈強，變壓器發熱溫昇的穩定值也就愈小。

我們引用下面的符號：

τ —— 油浸式變壓器繞組對於油的溫昇；

θ —— 油對於外界冷卻媒質（空氣、水）的溫昇；

θ —— 油浸式變壓器繞組對外界冷卻媒質的溫昇

$$\theta = \theta + \tau;$$

ϑ_c —— 冷卻媒質（空氣、水）的溫度；

ϑ —— 發熱體的溫度，如：

$$\text{油溫 } \vartheta_{\kappa c} = \theta + \vartheta_c;$$

$$\text{繞組溫度 } \vartheta_{o\delta\kappa} = \theta + \vartheta_c = \theta + \tau + \vartheta_c.$$

均勻物體發熱和冷卻的一般方程式為：

$$P dt = cG d\theta + kS\theta_c dt, \quad (1)$$

其中 P ——用來產生熱的總損失，瓦；

t ——時間，秒；

c ——物體的比熱，即 1 公斤重的物體，溫度升高 1°C 所需要的瓦秒數；

G ——物體的重量，公斤；

k ——散熱係數，即發熱物體高於周圍媒質的溫度為 1°C 時，每平方公尺的物體面積在每秒鐘內所散出的瓦數；

S ——物體的冷却面積，平方公尺；

θ_t ——在時間 t 內，物體對於冷却媒質的溫昇。

現在讓我們來研究下面的兩種情形：

a) $P = \text{常數}$ 。顯然，在穩定狀態下，也就是當 $d\theta = 0$ 時，發熱物體中在每單位時間內由損失變成的熱量全部發散到周圍冷却媒質中。在這種情況下，物體的溫度不再升高而進入一個穩定狀態，其最後溫昇為 θ_y 。由此得出：

$$P = kS\theta_y, \quad (2)$$

即

$$\theta_y = \frac{P}{kS}. \quad (3)$$

從另一方面，假定發熱物體沒有熱量發散到周圍媒質中去，亦即當 $kS\theta = 0$ 時，可得：

$$Pt = cG\theta. \quad (4)$$

在這種情形下，當某一數值 $t = T$ 時，可能得到 $\theta_T = \theta_y$ 的結果，因此式(4)可用下面的式子表示：

$$PT = cG\theta_y, \quad (4a)$$

因之可得

$$\theta_y = \frac{\dot{P}}{cG} T. \quad (5)$$

比較(3)、(5)兩式，即可得：

$$T = \frac{cG}{kS}. \quad (6)$$

由上式可知，對於某一物體而言， T 是一個恒定的數值，所以也叫做時間常數。在這一時間內，當沒有散熱時，物體的過熱等於有散熱時熱損的數值。將方程式(1)積分並注意當 $t=0$ 時， $\theta_t = \theta_0$ ；即可得：

$$\theta_t = \theta_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}}. \quad (7)$$

方程式(7)係表均勻物體的發熱或冷卻過程的一般式子，當 $\theta_y > \theta_0$ 時，表示穩定溫昇大於初始溫昇，因此(7)式代表發熱過程；當 $\theta_y < \theta_0$ 時，則表示穩定溫昇小於初始溫昇，而(7)式即代表冷卻過程。

當 $\theta_0 = 0$ 時，(7)式變成下面的形式：

$$\theta_t = \theta_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (8)$$

而當 $\theta_y = 0$ 時，則(7)式成為：

$$\theta_t = \theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}}. \quad (9)$$

可以看出，在油浸式變壓器中，散熱可認為幾乎完全屬於油的對流作用。此外，由於各個熱源(鐵芯、低壓繞組、高壓繞組)之間油槽的存在，每個熱源的發熱事實上並不與其他隣近熱源的發熱有關，而僅與每個熱源本身的熱負荷有關。並且每個熱源都可以看作同類物體。在決定這些熱源

〔對油的溫昇〕^①時，每個熱源都可以應用(7)，(8)和(9)三式，而且按照(3)和(6)式可得下面各式：

對高壓繞組

$$\tau_y = \frac{P_{BH}}{k S_{BH}}; \quad T_{BH} = \frac{(cG)_{BH}}{k S_{BH}};$$

對低壓繞組

$$\tau_y = \frac{P_{HH}}{k S_{HH}}; \quad T_{HH} = \frac{(cG)_{HH}}{k S_{HH}}; \quad (10)$$

對鐵心

$$\tau_y = \frac{P_{\text{магн}}}{k S_{\text{магн}}}; \quad T_{\text{магн}} = \frac{(cG)_{\text{магн}}}{k S_{\text{магн}}}.$$

油的發熱是由變壓器的總損失 $\Sigma P = P_{BH} + P_{HH} + P_{\text{магн}} = P_{\kappa} + P_{x.x}$ 轉變而來，而且對油來說，其冷却表面就是油箱的表面積 S_{δ} ，因此油對於周圍空氣的溫昇即為：

$$\theta_y = \frac{\Sigma P}{k' S_{\delta}}; \quad T_{\text{мс}} = \frac{(cG)_{\text{мс}}}{k' S_{\delta}}. \quad (11)$$

所以，要按照上面所示的(7)，(8)和(9)三式來決定變壓器發熱元件在任何瞬間 t 的發熱狀態，只要知道了相當於某一給定負荷時變壓器的穩定溫昇數值 θ_y 和 τ_y 就可以了。

從(7)、(8)、(9)三式可知，當 $e^{-\frac{t}{T}} = 0$ 時，也就是 $\frac{t}{T} = \infty$ 時，溫昇才可達到穩定溫昇 θ_y 和 τ_y ，而事實上當 $\frac{t}{T} = 4.6$ 時，溫昇已可達到穩定值，因為 $e^{-4.6} = 0.01$ 。換言之，在變壓器的某一給定負荷下，其損失 P_{BH} 、 P_{HH} 和 ΣP

^① 這裏和後面，為了使敘述簡單起見，特地採用生產術語〔對媒質的溫昇〕來表示物體(例如繞組銅)對於周圍媒質的溫昇(例如，油)。

也由這個負荷來確定，其穩定溫昇在該負荷開始後的時間 $t=4.6T$ 時就達到了。至於 T 的數值，從(10)和(11)式就可知道，是由變壓器發熱部分的比熱 c 、重量 G 和散熱表面積 S 的大小而決定。在油浸式變壓器中，上述數量的關係通常是：繞組的時間常數在 4—7 分鐘的範圍內波動，而油的時間常數則在 2—4 小時的範圍內波動。

因此繞組對油的穩定溫昇，在負荷開始之後，過了 20—30 分鐘就能達到，而油對於冷却媒質的穩定溫昇，則要在這個負荷開始後 10—18 小時才能達到，與繞組比較起來，油的發熱(或冷却)是很緩慢的。

由於這種情況，(7)、(8)、(9)三式，雖然並未考慮到銅的歐姆電阻對於溫度的變化的影響以及因溫度變化使油粘度改變的影響一類的重要因素，但用來決定一般運行情況下的發熱，實際上是完全可以採用的。因此，這些公式就作為以後計算的基礎。

只有在十分短暫的大量過負荷下才計算歐姆電阻的變化。此時油的溫度幾乎未變，而繞組却很快地發熱。

反之，油的粘度變化只有在長期連續負荷時，以及特別是處在很高和很低的氣溫下來進行絕緣損壞的計算時，才應予以考慮。這個問題將在第三章裏加以說明。

6) P 隨溫度而變化。例如在繞組中就發生這種情況，由於導線溫度的增加，其歐姆電阻 R 即隨之而增大。

設 $\vartheta_{06M,0}$ 表示繞組在起始時即 $t=0$ 時的溫度，而 $\vartheta_{06M,t}$ 表示在瞬間 t 時繞組的溫度，則

$$\Delta\vartheta = \vartheta_{06M,t} - \vartheta_{06M,0} = \theta_t - \theta_0 = \Delta\theta,$$

並可得：

$$\frac{P_t}{P_0} = \frac{R_t}{R_0} = \frac{235 + \vartheta_{06\pi.t}}{235 + \vartheta_{06\pi.0}} = \frac{235 + \vartheta_{06\pi.0} + \Delta\theta}{235 + \vartheta_{06\pi.0}};$$

$$P_t = P_0 \left(1 + \frac{\Delta\theta}{235 + \vartheta_{06\pi.0}} \right).$$

其中 $\Delta\theta$ ——在時間 t 內繞組溫昇的增量。

一般說來，在計及具有散熱和電阻 R 變化的發熱計算中，因為採用了某些假定，所以只能得出近似值。

因為考慮電阻的變化，如上面所說的，只有在極短時期內大的事故過負荷時方屬必要。油浸式變壓器可以接受下面的假定，就是在過負荷過程中，油溫來不及增高而仍舊保持不變。因此所說的問題只是繞組對於油的溫昇的增量，於是按照本章開始部分的符號，可以用 $\Delta\tau$ 代替 $\Delta\theta$ 。

用 P_{75} 來表示 P_0 ，也就是用相當於標準工作溫度 75°C 時的損失來表示 P_0 （大家都知道，在蘇聯國家標準和目錄中所指的損失均係換算到這個溫度），在經過代入和某些變換之後，得出：

在 $t < 15$ 分鐘時，

$$\Delta\tau = \frac{1}{\beta} \left(\frac{235 + \vartheta_{06\pi.0}}{310} \tau_y - \tau_0 \right) \left(1 - e^{-\beta \frac{t}{T}} \right); \quad (12)$$

在 $t \geq 15$ 分鐘時，

$$\tau'_y = \Delta\tau + \tau_0 = \sigma(235 + \theta_0) + \sigma\vartheta_\theta = \tau''_y + \sigma\vartheta_\theta. \quad (13)$$

在(12)和(13)式中各符號的意義如下：

$\Delta\tau$ ——在時間 t 內繞組銅質溫昇的增量；

τ_y ——在不考慮電阻變化時，繞組對於油的穩定溫昇；

τ'_y ——同上，但考慮電阻變化；