

〈研究論文〉

터빈發電機 固定子端部の 溫度上昇에 關한 研究

A Study on the Temperature-rise at the Stator end portion of Turbine Generator.

〈建國大工大助教授〉

任 漢 錫*

Abstract

In accordance with introducing extra high voltage system, system power plants have to be operated in underexcited condition, which causes temperature rise at the stator end portion of turbine generator.

This paper deals with (1) various elements affecting temperature rise and (2) methods of pre-estimating temperature rise.

1. 緒 論

터빈發電機는 機械的 應力이 큰 2極高速機로서 構造上 各種機械的 制約을 받으며 單一軸材 製作限度 및 限度內軸材에 의한 可能出力增大의 問題를 解決하기 위해서 確立된 新技術은 主로 冷却方式의 改善으로서 間接冷却方式에서 直接冷却方式으로 轉換된 것이다.

이러한 冷却方式의 進歩에 따라 發電機의 電氣裝荷, 磁氣裝荷가 增加되었으며 이것은 相對的으로 發電機構造 各部의 熱容量의 減少를 意味하게 되므로 여러가지의 運轉狀態 特히 異想運轉時에는 從來의 間接冷却發電機인 小形機에 比해서 苛酷한 運轉條件을 甘受해야되므로 設計時의 充分한 考慮는 勿論이지만 各種運轉條件에 對한 許容限界를 完成品 또는 運轉中の 機器에 對해서도 明確히 할 必要가 있다.

發電機에 對해서는 製作者가 定格力率의 可能出力을 保證하고 있으나 實際의 運轉에 있어서 는 系統狀態에 따라 定格力率로 運轉되지 않고

系統要請에 따른 任意力率로 運轉되는것이 普通이다. 圖 1은 水素冷却發電機의 運轉狀態에 따른 可能出力曲線으로서²⁾

- (1) 固定子卷線의 溫度上昇으로 制限되는 部分
- (2) 回轉子卷線의 溫度上昇으로 制限되는 部分
- (3) 固定子端의 溫度上昇으로 制限되는 部分
- (4) 定態安定限界에 依해 制限되는 部分 等 4

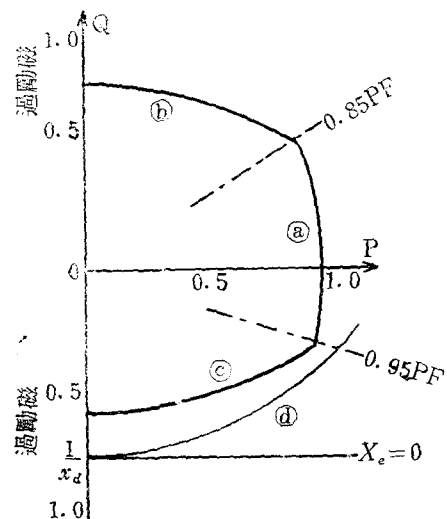


圖 1. 可能出力曲線
Fig. 1 Capability curve

* 電氣技術士 (發送配電)

가지의 限界에 依해 構成되는 曲線이다.

(a) 曲線은 遲相領域으로 定格力率과 100%力率의 範圍로 發電機出力이 固定子電流 即 固定子溫度上昇을 決定된다.

(b) 曲線은 遲相領域으로 定格力率과 0%力率 範圍로 發電機出力이 回轉子電流 即 回轉子溫度上昇에 依해 決定된다.

進相領域에서 圓筒形發電機의 出力制限要素이 2가지는 (c) 曲線이 나타내는 固定子端部構造의 過熱과 (d) 曲線의 定態安定度曲線이다.

近年 超高壓系統의 導入, cable系統의 增大로 深夜電壓이 上昇하고 深夜輕負荷時의 系統電壓과 無効電力潮流의 調整이 困亂하게 될 것으로 豫想된다.

進相運轉時의 問題點으로서는 系統의 安定度와 發電機 및 所內補機의 電壓降下外에 發電機 固定子端의 漏洩磁束增加로 因한 過熱이다.

定常界磁電流值에서는 end ring이 飽和되어 漏洩磁束은 적지만 進相運轉으로서 界磁電流가 減少하면 不飽和되어 漏洩磁束이 增加하여 端部 加熱現象을 이르게 된다. 進相運轉時의 溫度上昇은 試驗으로 確認하는 것이 가장 바람직하겠으나 이것은 發電機를 實系統에 接續하여 施行하여야 되므로 實施上 困亂이 따르게 된다.

即 溫度試驗을 行하는데, 長期間을 要할 뿐 아니라 試驗中 特別한 系統構成이 必要하게 되므로 系統運用的 問題 또는 萬一의 事故發生에 對한 對策이 必要하게 된다.

本文에서는 溫度上昇推定式을 誘導하고 溫度上昇의 輕減對策을 提示하고자 한다.

2. 溫度上昇推定

2.1 端部の 構造

圖 2는 發電機固定子端部構造이다. 圖中 ①은 固定子鐵心으로 主磁束의 通路를 形成하고 大形機에는 方向性硅素銅板을 使用한다.

積層鋼板을 締付, 固定하기 爲하여 ②의 外測間隔片 및 ③의 押板이 있다.

外測間隔片은 押板으로 鐵心全體를 締付하는 役割을 한다. ④는 固定子卷線의 端部로서 이部分에 흐르는 電流에 依해서 端部の 磁束이 發生된다.

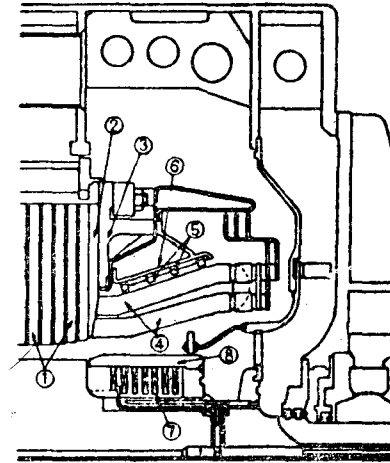


圖2. 固定子 端部の 構造

Fig 2. Construction of stator end

⑤는 coil end를 支持하는 環狀帶이고 ⑥의 環狀帶支持에 取付되어 있다.

回轉子側 卷線端部는 end ring으로 固定되었으며 이의 材質은 端部磁束의 分布에 큰 影響을 미친다.

2.2 等溫度上昇線圖

單位法으로 表示된 有効電力—無効電力特性曲線上에 等溫度上昇線圖를 作成할 수 있다. 固定子端部の 任意點의 等溫度上昇線圖는 圖 3의 A點의 軌跡을 0를 中心으로 하고 $R_T = OA$ 를 半徑으로 하는 半圓이다. 이 等溫度上昇線圖는 다음과 같은 性質이 있다.^{2) 3)}

(1) 固定子端部の 電機子磁束의 磁氣抵抗이 R_a , 回轉子磁束의 磁氣抵抗이 R_f 일 때

$$R_a/R_f = \lambda / (1 + \lambda) \quad (1)$$

로 놓으면 λ 가 等溫度上昇線圖를 決定하는 主要한 要素의 하나가 된다.

(2) 圖 3에서 CD 를 OA 에 平行으로 그으면 $AD/DB = \lambda$ 로 되고 CD 의 크기를 X 라 할때 X 의 크기가 溫度上昇에 關係된다.

어떤 點의 溫度上昇이 $1^\circ C$ 로 되는 X 를 X_0 라 하면 任意容量의 溫度上昇은

$$T = (X/X_0)^2 \quad (2)$$

으로 주어진다.

X_0 는 前記 λ 와 함께 等溫度上昇線圖를 決定짓는 要素로서 其部分의 材料로서 決定되는 값이다.

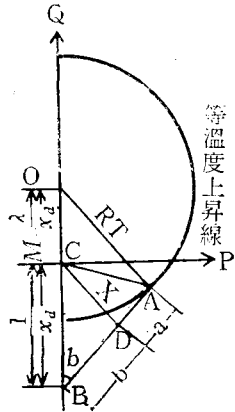


圖 3. 等溫度上昇線圖
Fig 2. Equi-temperature-rise diagram

(3) 等溫度上昇線圖의 原點 0의 位置는 P-Q 特性의 原點 C에서 Q軸上에 λ/x_d 만큼 遲相率 側에 있다.

x_d 는 單位法으로 表示된 同期 reactance의 不飽和值이다.

이때 OC 의 값을 M 과 하면

$$M = \lambda/x_d \quad (3)$$

(4) 半徑 R_T 에 關係서는 다음의 關係가 成立한다.

$$R_T = (1 + \lambda)X \quad (4)$$

容量 A 일 때 溫度上昇 $T(^{\circ}C)$ 는 溫度上昇이 磁束密度의 自乘에 比例하므로 次式으로 表示할

수 있다.

$$T = (X/X_0)^2 = [R_T/(1 + \lambda)X_0]^2 \quad (5)$$

R_T (單位法)는 任意負荷 A 의 出力을 P (單位法), 無効電力을 Q (單位法)라 하면

$$R_T = \sqrt{P^2 + (Q + M)^2} \quad (6)$$

但 Q : 進相時正, 遲相時負

(3), (5), (6)式에서

$$T = \frac{P^2 + \left(Q + \frac{\lambda}{X_d}\right)^2}{(1 + \lambda)^2 \cdot X_0^2} \quad (7)$$

以上에서와 같이 λ 및 X_0 의 값을 알면 任意負荷時의 溫度上昇을 推定할 수 있다.

2.3 實測值로부터 任意負荷溫度上昇의 推定方法

圖 3에서

$$X = \sqrt{BD^2 - 2BD \frac{1}{X_d} \cos \delta + \frac{1}{X_d^2}} \quad (8)$$

여기서 $BD = \overline{AB} \times b / (a + b) = \overline{AB} / (1 + \lambda)$

또한 $1/x_d = A$, $\overline{AB} = B$, $1/(1 + \lambda) = n$ 라 하면 A, B 및 δ 는 任意容量에 對해 決定되고 n 는 未知數이다.

(8)式에서

$$X = \sqrt{(nB)^2 - 2nAB \cos \delta + A^2} \quad (9)$$

渦電流損은 磁束密度의 2乘에 比例하므로 溫度上昇은 次式으로 表示한다.

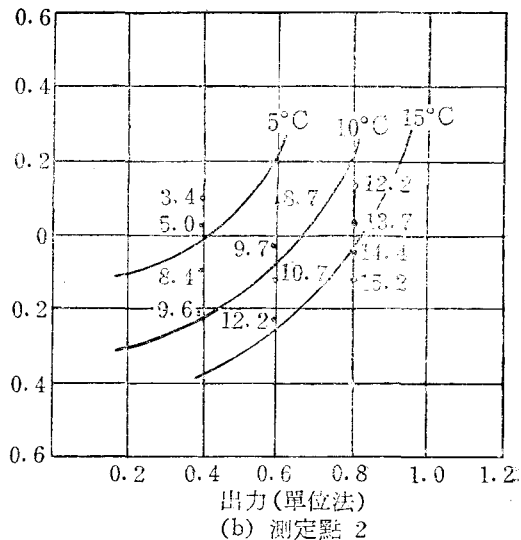
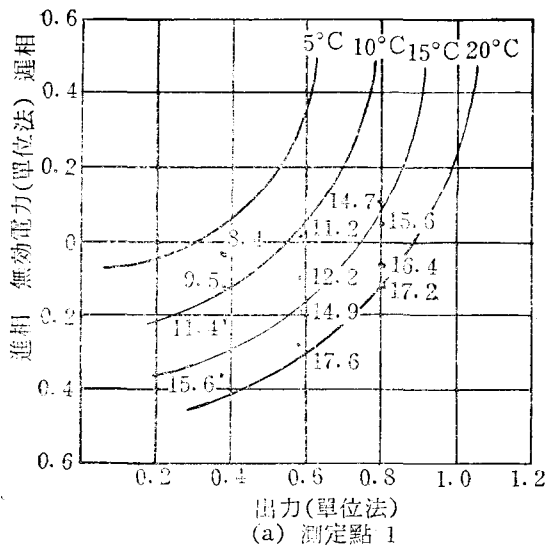


圖 4. 2點의 實測值로부터 定한 等溫度上昇線圖 (167,000KVA)

Fig 4. Equitemperature-rise determined by two-point optional measurement (167,000KVA)

$$T = T_0 + K_1 X^2$$

$$= T_0 + K_1 (n^2 B^2 - 2n AB \cos \delta + A^2) \quad (10)$$

여기서 T_0 : 風損에 의한 溫度上昇

K_1 : 比例定數

(10)式의 未知數는 T_0, K_1, n 의 3個이므로 任意의 等溫度上昇線圖는 任意負荷時의 溫度上昇 實測值 3點을 얻으면 決定될 수 있다. 風損에 의한 溫度上昇은 $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 로서 無視하면

$$T = K_1 (n^2 B^2 - 2n AB \cos \delta + A^2) \quad (11)$$

(11)式을 使用하면 任意負荷 2點의 實測值에 依해서 等溫度上昇特性 및 任意負荷時의 溫度上昇值를 算定할 수 있다.

2.4 工場試驗值로부터의 溫度上昇推定

工場試驗의 結果를 有効電力—無効電力特性 (P—Q特性)上에 表示하면 任意負荷時의 溫度를 推定할 수 있으며 이때 open test에 對해서는 P—Q特性의 原點上에 表示되고 R_T 는 M이 될 것이다.

short test는 端子電壓零이므로 그대로 使用할 수 없으며 等價負荷를 考慮하여 P—Q特性上에 表示하기 爲하여 먼저 定格電壓, 遲相力率零의 電流 I를 흘릴때 圖 5와 같이 表示된다.

I의 값과 端部磁束은 比例하며 回轉子磁束의 影響이 없이 電機子電流만이 흐르는 경우를 架想하면 端部磁束은 I에 比例하고 溫度上昇도 이 값에만 關係된다. 實際로는 $I_f = I + 1/x_d$ 의 界磁

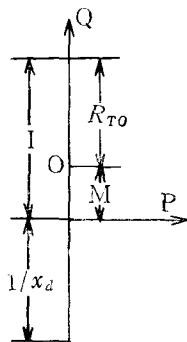


圖 5. 遲相零力率의 P-Q 特性上表示

Fig 5. Lagging zero power factor on P-Q Characteristics

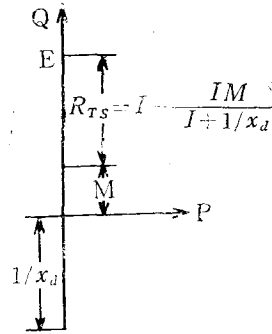


圖 6. 短絡電流 I의 等價負荷表示
Fig 6. Equivalent load of short circuit current I

電流가 흐르므로 溫度上昇에 關係되는 端部磁束은 $R_{T0} = I - M$ 에 比例하게 된다.

따라서

$$\text{合成磁束} = K_f (I - M) = K_f \cdot R_{T0} \quad (12)$$

短絡電流 I를 흘렸을 때는 短絡電流에 對應하는 界磁電流가 흐르므로 界磁電流는 open test에 比해서 $I / (I + \frac{1}{X_d})$ 로 減少한다. 따라서 界磁電流의 磁束으로 電機子電流分의 磁束減少는 M代身 $IM / (I + 1/X_d)$ 로 된다. short test時의 R_T 를 R_{Ts} 라 하면

$$\text{合成磁束} = K_f \left(I - \frac{IM}{I + 1/X_d} \right) = K_f \cdot R_{Ts} \quad (13)$$

R_{Ts} 를 P—Q特性上의 E點에 잡으면 E點은 short test의 等價負荷이다.

任意電流 I로 short test時 溫度上昇을 α , open test의 溫度上昇을 β 라 하면 (5)式에서

$$\alpha = [R_{Ts} / \{(1 + \lambda) X_0\}]^2 \quad (14)$$

$$\beta = [M / \{(1 + \lambda) X_0\}]^2 \quad (15)$$

$$\sqrt{\alpha} X_0 (1 + \lambda) = I - \frac{IM}{I + 1/X_d} \quad (16)$$

$$\sqrt{\beta} X_0 (1 + \lambda) = M \quad (17)$$

(16), (17)式에서

$$M = \frac{I \left(I + \frac{1}{X_d} \right)}{\sqrt{\frac{\alpha}{\beta} \left(I + \frac{1}{X_d} \right) + I}} \quad (18)$$

(3), (15)式에서

$$X_0 = \frac{M}{\sqrt{\beta (1 + x_d M)}} \quad (19)$$

任意負荷時의 溫度上昇은

$$T = T_0 + \frac{R_T^2}{(1+\lambda)^2 \cdot X_0^2} \quad (20)$$

(20)式에서

$$R_T = \sqrt{T - T_0} (1+\lambda) X_0 \quad (21)$$

以上과 같이 X_0 , M 또는 λ 의 값이 決定되면 任意的 溫度上昇值 $T^\circ C$ 에 對한 等溫度上昇線圖의 半徑이 決定되므로 이 線圖에 依해서 任意負荷狀態에 對한 溫度上昇이 P-Q特性 曲線에서 求해진다.

3. 溫度上昇經減對策

터빈發電機는 卷線端에 흐르는 電流에 依한 強大한 磁束으로 進相運轉時뿐 아니라 平常運轉時에도 固定子端部に 큰 渦流損을 發生시킨다.

이의 輕減對策으로서, 아래와 같은 것을 들 수 있다.

(1) 端部損失發生個所를 非磁性體로 하여 磁束의 集中을 抑制한다.

(2) slit分割에 依해 渦電流의 通路를 制限한다.

(3) 回轉子 end ring을 非磁性體로 하여 磁路의 磁氣抵抗을 增加시킨다.

(4) 固定子鐵心端部를 段落形으로 하여 主磁束의 卷線端部漏洩로 因한 損失을 輕減시킨다.

4. 結 論

以上에서 얻은 結論을 要約하면 아래와 같다.

(1) 固定子端部の 溫度上昇은 P-Q特性曲線上에 作圖할 수 있으며 이 特性圖에 依하여 絕緣物의 制限溫度에 따른 負荷別 許容運轉力率을 推定할 수 있다.

(2) 等溫度上昇線圖를 作成하기 爲위서는 任意負荷時 最少限 2個의 溫度上昇實測值가 必要하다.

(3) 工場試驗으로서 定格電壓無負荷試驗과 三相短絡試驗結果를 等價負荷法利用으로 溫度上昇을 推定할 수 있다.

(4) 渦電流損을 輕減하여 溫度上昇을 抑制하기 爲하여 固定子端部構造物을 非磁性體로 하고 材料의 抵抗率을 增加시켜야 한다.

※ 參考文獻

- (1) 橫園登：電力設備現場試驗マニュアル，電氣書院 p.150 (1967)
- (2) 吉松輝彦：電氣計算 vol. 38, 電氣書院, p. 44 (1970)
- (3) H. Happoldt: Elektrische Kraftwerke und Netze, Spring-Verlag, p.72~78(1970)