

# 以 d-q-o 軸為基礎分析同步電機之

## 轉子動態響應及保護策略

台灣科大電機系 蕭弘清

台電綜合研究所 鄭強

### 摘要

本文係以三相旋轉電機之 a-b-c 軸三相對稱系統轉換為 d-q-o 軸座標系統，利用直軸與交軸之成分為非時變(Time-Invariant)性質，分析旋轉電機定子與轉子電感在穩態、暫態、次暫態時期中，定字及轉子耦合電路的物理現象。在三相對稱短路故障之情況下，定子與轉子電路於磁耦合效應中的感應磁路，包含主磁場線圈、阻尼線圈以及鐵心三條路徑，在轉子鐵心磁路上流動的渦電流(Eddy current)損失，即為電機轉子鐵心異常過熱的來源。電機發生對稱及非對稱短路故障時，電機的磁場耦合擴大了在轉子鐵心上的渦電流。此外考慮電機之電樞及磁場斷路器動作跳脫隔離故障後，故障電流並不因此被清除，在轉子剩磁作用下，故障電流將持續 2~3 秒鐘的時間，繼續在電機內部流動，因而增強故障電流對電機轉子溫昇之影響。

### 壹、前言

發電機的異常狀態包含電機線圈故障、過載、線圈或是軸承過熱、超速、失磁、馬達化運轉、單相或是電流不平衡之運轉、失步、次同步共振等項目；這些異常條件除軸承過熱屬於機械性質之外，其他各異常項目均屬於電氣上的異常因素。

就電機線圈過熱保護而言，可直接以溫度感知器量測電機之運轉溫度。因此，定子線圈及鐵心的溫度，多以熱電偶或是熱敏電阻器(RTD)作為偵測相對溫昇之檢測工具；但是對於電機轉動部上的場繞組、阻尼繞組與鐵心之溫度量測，難以運用上述方式直接量測轉子溫度。電機保護可區分為定子保護與轉子保護兩個方向，定子保護以電樞繞組短路及接地故障等異常狀態為主，轉子保護除磁場開、短路及接地故障因素外，尚須慎重考慮轉子異常溫昇之情況。運轉中的電機係以不平衡電流中的負相序電流分量，作為偵測轉子溫昇之轉換基礎，因此，轉子過熱保護可歸類於後衛保護或者是預防性質之保護。

交流三相電機電流之不平衡的因素，可從穩態及動態響應兩個方向考慮之；穩態情況較偏重正常系統之負載不平衡性；動態情況，則考慮外部系統輸電線路發生事故及其復閉操作(Transmission Line Reclosing)之衝擊。線路與電機各有其保護區間與責任範圍，因此，線路發生事故時，電機之主保護電驛無動作之必要，反之亦然。假設線路發生事故，主保護電驛必須在偵測故障後，儘速動作相關斷路器以隔離故障。輸電線路於故障清除約 500 毫秒後，自動控制程序會將已跳脫的斷路器，進行復閉操作(Transmission Line Reclosing)。若是線路復閉失敗，則故障電

流在短暫時間中，由電機電樞耦合至轉子之感應電流，亦因而對電機形成多次衝擊，並在轉子鐵心表面產生渦電流損失，此感應渦電流造成轉子溫昇效應；在最惡劣的情況下，可能嚴重損壞轉子結構，此即為發電機電流不平衡後衛保護之主要考慮因素[1][2][3]。

靈敏度較差的保護系統，清除及隔離事故必將耗費更長的時間，可能導致單一事故演進成多重故障，事故因而擴大及加重故障的程度，電機將耗費更長的修復時間及更高的停機損失。因此電機或是線路發生異常狀況，則必須迅速地隔離事故，並視情況需要予停機檢修，可防止設備損壞程度及增加維護的複雜性。

## 貳、不平衡電流對電機的影響

早期研究電機轉子過熱之物理現象，主要是建立在對稱分量中的分析上，負相序電流經由電樞感應至轉子，並以系統之兩倍頻率於轉子電路上產生渦電流損失，此一感應電流在轉子之鍛造實體、非磁性的楔槽以及阻尼環上流動，使得轉子之  $I_2^2 R$  損失增高，可導致轉子溫度快速上升，此段敘述即為轉子異常溫昇之由來。

對稱分量是一種適用於多相系統，是計算電力系統不平衡情況的主要工具，它可經由線性轉換將不平衡及非對稱的電壓、電流或是阻抗，分解為三個平衡的相序分量，分別以零相序( $I_0$ )、正相序( $I_1$ )與負相序( $I_2$ )分量表示。若是平衡網路中的相序間無耦合關係，則其任一相序的電流僅會產生同相序的電壓降。涉及對稱系統的非對稱故障時，不平衡電壓與電流可分解為對稱成分，分別處理各分量後，再將其結果重疊即可求解。利用穩態對稱電路計算電力系統的故障響應是非常重要的

工作，若是需要進一步分析動態響應，可將對稱成分法結合動態響應的時間常數，則可將正弦穩態分析結果，進一步適用於動態響應中。

在發生非對稱故障的短暫期間中，電機輸出之負相序電流，遠大於不平衡運轉狀態中的負相序分量。因此，非對稱故障較對稱故障及不平衡負載，更易引起同步電機轉子在短時間內產生額外的溫昇。此一異常溫昇的現象，可能引起轉子更嚴重地故障。當然，不平衡電流亦會引起機組振動，但是轉子過熱的問題較其更為尖銳[2][3][4]。

ANSI 標準是以電機之額定電流值為標么值，並以此標么值作為負相序電流值( $I_2$ )的基準。電機容許負相序電流在電樞電路上流動的極限值，是依此電流所攜帶的損失能量而定。即為負相序電流的平方值乘以時間等於常數  $k$  值；以  $I_2^2 t = k$  表示。式中  $I_2$  是指負相序電流分量的大小， $t$  是持續在電機電路中流動的時間，以秒為單位。不同型式的汽機與水輪機，其電機轉子的  $k$  設計值不同，例如；使用間接冷卻設計的汽渦輪發電機、同步電容器、頻率轉換器(Frequency-Changererators)可在  $I_2^2 t = k = 30$  的容許範圍內運轉。以水輪機或是內燃機驅動之機組常數值為  $k=40$ 。電機容量在 800 MVA 以內直接冷卻的機組，則  $k=10$ 。1600 MVA 這種非常大型的機組，它的容許值則僅有 5。因此轉子異常溫昇，防性的偵測故障檢查點，是以  $k$  值之 200%為基準，當故障值大於  $k$  值的 200%時，會令機組產生嚴重的故障[1]。

NEMA、IEEE Std 141 及相序對稱分量，分別定義了電壓不平衡率，其定義分述如下：

## 1. NEMA 電壓不平衡率定義：

$$V_{L-L}UR(\%) = \frac{\text{三相線電壓與三相線電壓平均值的最大偏差量}}{\text{三相線電壓的平均值}} \times 100\% \quad \text{式 1}$$

## 2. 根據 IEEE Std 141 相電壓不平衡率 (Phase Voltage Unbalance) 的定義：

$$V_{phase}UR(\%) = \frac{\text{三相相電壓與三相相電壓平均值的最大偏差量}}{\text{三相相電壓的平均值}} \times 100\% \quad \text{式 2}$$

## 3. 相序對稱分量之電壓不平衡因數 (Voltage Unbalance Factor; VUF) 定義如下：

$$d_2 = \frac{\text{負相序電壓分量的大小值}}{\text{正相序電壓分量的大小值}} = \frac{|V_2|}{|V_1|} \quad \text{式 3}$$

亦可以百分率的表之：

$$VUF(\%) = \frac{\text{負相序電壓分量的大小值}}{\text{正相序電壓分量的大小值}} \times 100\% = \frac{|V_2|}{|V_1|} \times 100\% \quad \text{式 4}$$

上式中  $V_2$ 、 $V_1$  表示對稱成分中負相序分量與正相序分量。

### 參、負相序時間過電流保護(Negative Sequence Time overcurrent Relay)電驛

負相序時間過電流保護電驛，係用於保護發電機來自於不平衡運轉，可能損壞轉子線圈之異常情況。負相序時間過電流元件之相序濾波器，可有效濾除正相序電流分量，並僅針對電流中的負相序分量作用。負序時間過電流電驛之主要功能包含：時間過電流元件經由電驛所提供之輸出接點與電控迴路連接，可提供警報與跳脫功能。電驛主要設定值如表一。

負相序時間過電流元件之動作特性說明如下：

表 1 · 負相序時間過電流電驛基本設定參數

項 目	範 圍
k 值	2~40
電流分接頭設定值	3.1~4.9 安培
啟動跳脫信號設定值 ( $I_2$ pu)	0.09~0.40 (分接頭設定值)
啟動警報信號設定值 ( $I_2$ pu)	0.03~0.20 (分接頭設定值)
跳脫延時	0.2~250 秒
警報延時	2.97~3.03 秒

$$I_2^2 t = k$$

$I_2$  = 負相序電流標么值 (pu)

$$I_2(\text{pu}) = \frac{I_2}{\text{電流分接頭設定值}} \quad \text{式 5}$$

$$I_2(\%) = 100 \times I_2(\text{pu})$$

$t$  = 不平衡運轉之響應時間 (秒)

$k$  = 電機轉子溫昇之短時間 與持續運轉能力

#### 一、電驛設定功能：

設定發電機之負相序過電流電驛的考慮因素，涵蓋了一些複雜的因素，其設計原理與裝置目的，在於預防發電機因負相序電流所造成的損壞，其中的影響因素包含不平衡負載或是電機暴露在拖延過長的不平衡故障中。系統側保護電驛正確的清除故障，可避免機組產生非必要性的停機。因此，機組保護電驛與系統保護電驛之間，如線路保護、匯流排差動保護以及斷路器失靈後衛保護等，應有妥善的保護協調規劃。

系統側的相間故障是考慮機組負相序保護協調中的一種嚴格情況，假設故障點位於系統側，初始條件是斷路器正確動作，清除故障後之停電範圍恰巧包含匯流排，且斷路器跳脫後，跳脫之斷路器進行自動復閉(reclosing)且斷路器復閉失敗，第二次的斷路器跳脫亦失敗；此時，斷路器失靈保護規劃中的相關斷路器必將動作

跳脫。故障→復閉→(復閉失敗)斷路器失靈→斷路器失靈後衛電驛動作→隔離故障。因此適當檢討斷路器失靈之後衛保護所需之保護協調時間，若是小於電機負相序過電流保護之設定值  $I_2^2 t$ ，則可避免機組不必要的停機。

負相序時間過電流電驛的設定值或調整步驟如下：

### 1. 電流分接頭設定範圍

建立電流分接頭之標么值與始動值及動作時間特性有關。由方程式  $I_2^2 t = k$ ， $I_2$  項目是指電機定子電樞滿載電流之標么值，電驛之電流分接頭必須選擇在接近發電機的滿載電流值，在此發電機的滿載電流是指來自比流器的二次側電流；如此可將電驛之時間特性與發電機之熱特性(generator heating characteristic)參考至同一基準上。電流分接頭自 3.1~4.9 安培、每 0.2 安培具有一分接頭可供選擇，可適用電機負載電流在 3.0~5.0 安培的範圍中。

### 2. 檢測跳脫位準之始動值

偵測負相序電流之始動值，可在電流分接頭設定值之 0.09~0.40 標么值的範圍中調整其始動設定值。精確的設定值需要考慮最小始動電流設定值，及其時間特性(250 秒延時範圍)是否充分涵蓋電機保護之考慮因素。

### 3. 檢測警報位準之始動值

警報信號之始動值設定在 0.03~ 0.2 標么值的範圍中可供選擇。設定原則敘述如下，例如電機導體可容許 0.06pu 之負序電流連續運轉，則警報偵測設定值可設定為(0.06pu)值或是較低值，當負序電流

的位準大於 0.06pu 及小於跳脫始動值時，警報元件可驅動蜂鳴器發出聲響通知運轉人員，以適時採取必要之矯正措施。

### 4. “k”設定值

電驛之“k”值必需與電機之熱特性匹配，電驛之設定值將稍低於電機特性值，所需要預留之裕度(margin)範圍，則是使用者需要考慮之處。在此需要注意電驛之延時範圍在 250~0.2 秒之間，最小動作電流所須之延時必須小於 250 秒，最短之動作時間必須為 0.2 秒，則可獲得良好的保護協調效果。

## 二、舉例說明例發電機-昇壓變壓器之機組參數及計算

1. 發電機 400 MVA, 25 kV
2. 變壓器 400 MVA
3. 發電機比流器匝比 10000/5 A
4. 基準值 400 MVA, 25 kV
5. 發電機之“k”值 10

計算：

$$MVA = \frac{\sqrt{3}I(kV)}{1000}$$

$$400 = \frac{\sqrt{3}I(25)}{1000}$$

$$I = \frac{400(1000)}{\sqrt{3}(25)} = 9238 A_{pri}$$

$$I = \frac{9238}{2000} = 4.62 A_{sec}$$

電流分接頭選擇 4.7 安培作為設定值  
跳脫動作之始動電流設定值(註 1) = 0.12pu, 0.12(4.62)=0.554 A (負相序電流值)  
假設在昇壓變壓器之高壓側發生相間故障，故障電流換算至比流器二次側為 8 安培，則

$$\frac{8.35}{4.62} = 1.81 pu$$

假設電機之熱值為  $I_2^2 t = 8$  之特性，則時間之計算值為

$$t = \frac{8}{1.18^2} = 2.45 \text{ (sec)}$$

在此，電驛之 k 值計算如下

$$\left(\frac{8.35}{4.7}\right)^2 (2.45) = 7.73$$

因此輸入電驛之電流為 4.7A 時，電驛之動作時間為

$$I_2^2 t = 7.73 \\ t = 7.73 \text{ (sec)}$$

設定值換算至電機滿載之基準時之 k 值，

$$\left(\frac{4.7}{4.62}\right)^2 (7.73) = 8$$

註：偵測故障之電流始動值必須具有充分的靈敏度，其始動值必須涵蓋電機在最小負載時，可預期之最小負相序電流。

## 肆、以 d-q-o 軸為基礎之電機的有效電路與高階模型

在三相系統中因電機定子與轉子上的電壓、電流及磁場，具有相互耦合及非線性的時變關係，以三相 a-b-c 軸之動態分析較為困難，故可將三相系統之物理量，轉換為同步旋轉座標系統下的直軸(d-axis)、交軸(q-axis)與零序(zero-sequence)成分。三相平衡系統的零序成分為零，且直軸與交軸之成分為非時變(time-invariant)，故可更清晰的分析次暫態、暫態與穩態三個時期的特性，及描述電機磁場耦合之物理現象。

同步機的定子與轉子兩個主要部分，都是由鐵磁材料所構成，定子亦稱電樞係

由電樞繞組線圈所組成；轉子是同步機的另一部份，它裝置在轉軸上並在定子中旋轉，其中場繞組是由繞線構成，組尼繞組係以短路銅棒穿過磁極面所構成與鼠籠式感應機的轉子結構類似，同步機安裝組尼繞組的目的是在降低同步機不穩定的震盪。

## 1. 轉子電路模型

### (1) 穩態電感

同步機定子與轉間耦合之穩態電感，因激磁電流( $i_f = c$ )固定不變及阻尼繞組( $i_{kd} = 0$ )電流為零。由戴維寧等效電路，可將圖 1 穩態電路之轉子側  $i_f$  及  $i_{kd}$  電流源以開路視之，故可將激磁繞組( $L_{f'}$ )與阻尼繞組( $L_{kd}$ )的漏感、轉子與定子之耦合電感忽略不計。

因為是在穩態中， $i_f$  固定不變， $i_{kd}$  及  $i_{kq} = 0$ ，因此固定不變的磁通鏈  $\lambda_d^s$ 、 $\lambda_q^s$  可以下式表示：

$$\lambda_d^s = \lambda_d - \Delta \lambda_d = \lambda_d - L_d i_d = L_{md} i_f \quad \text{式 6}$$

$$\lambda_q^s = \lambda_q - \Delta \lambda_q = \lambda_q - L_q i_q = L_{mq} i_g$$

因為凸極效應，使得磁場電壓是 d-q 軸上兩個電壓分量的相量合，穩態時再將旋轉速度考慮進來，因此可將轉子電壓轉換至定子側之 d-q 軸上，是固定不變的磁通鏈與角速度的乘積。亦可導出磁通波與定子線圈的相對運動產生速度電壓；電壓、電流與阻抗可利用歐姆定律互相變換計算。

$$E_f - jE_g = j\omega_r (\lambda_q^s - j\lambda_d^s)$$

將前式帶入磁通鏈的固定分量中，則

$$E_f = \omega_r L_{md} i_f = \omega_r L_{md} \left(\frac{v_f}{r_f}\right) \quad \text{式 7}$$

$$E_g = -\omega_r L_{mq} i_g = -\omega_r L_{mq} \left(\frac{v_g}{r_g}\right)$$

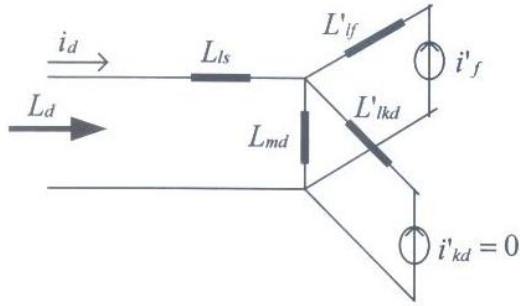


圖 1 · 同步機穩態 d 軸等效電路

交流電路中因為有時變頻率，使得含有鐵心磁路的電感效應呈現出來，亦使得線圈的電抗值大於電阻值， $X_l = \omega L \gg R$ ， $R =$ 繞線電阻。在此可將繞線電阻值忽略之。穩態時同步電感即為定子與轉子間的互感，亦即是 d-q 軸上的  $L_{md}$  與  $L_{mq}$  分量，在旋轉電機中此一電感值是時變的。

(2) 暫態電感

在各種不同情況的干擾下，會造成轉子偏離同步速度因而改變互感磁通鏈。在暫態的週期中，因為定子電流的變化，會在所有場繞組中產生感應電流，及產生反抗磁通變化的磁通鏈，也就是說在狀態改變的瞬間亦維持原有的磁通鏈。假設阻尼電路中的暫態響應，具有極高的阻尼，故同步電機轉子上的阻尼繞組電阻值大於場繞組，阻尼繞組上的感應電流其衰減速率遠快於場繞組，因此可以簡單的阻尼振盪時間常數  $t=L/R$  說明之。

首先考慮在 d 軸上，改變繞組上的磁通鏈：當

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_f &= 0 \text{ 及 } \Delta i_{kd} = \Delta i'_{kd} = 0, \\ \Delta \lambda_f &= L_{md} \Delta i_d + L'_{ff} \Delta i'_f = 0 \\ \Delta \lambda_d &= L_d \Delta i_d + L_{md} \Delta i'_f \end{aligned} \tag{式 8}$$

$$\text{則 } \Delta i'_f = -\frac{L_{md} \Delta i_d}{L'_{ff}}$$

在此僅考慮  $\Delta \lambda_d$  對應的  $\Delta i_d$  條件下(此點為轉換以簡化問題的目的)，亦即排除場電流的變數；則

$$\Delta \lambda_d = \left( L_d - \frac{L_{md}^2}{L'_{ff}} \right) \Delta i_d \tag{式 9}$$

在此情況下， $\Delta \lambda_d$  與  $\Delta i_d$  的大小比例是即為 d 軸上的暫態電感，以下式表示：

$$L'_d = \frac{\Delta \lambda_d}{\Delta i_d} = L_d - \frac{L_{md}^2}{L'_{ff}} \tag{式 10}$$

分析比較同步機的穩態、暫態電感之大小，則  $L'_d \ll L_d$ 。因此，在暫態時期的電流值大於穩態電流值。

相同地，考慮此繞組在 q 軸上磁通鏈的改變，可以寫出 q 軸之暫態電感方程式：

$$L'_q = \frac{\Delta \lambda_q}{\Delta i_q} = L_q - \frac{L_{mq}^2}{L'_{gg}} \tag{式 11}$$

圖 3 說明暫態週期中，d 軸電路的應用。

(3) 次暫態電感

在次暫態的週期中，場繞電路與阻尼電路都因磁通互感變化而產生電流。

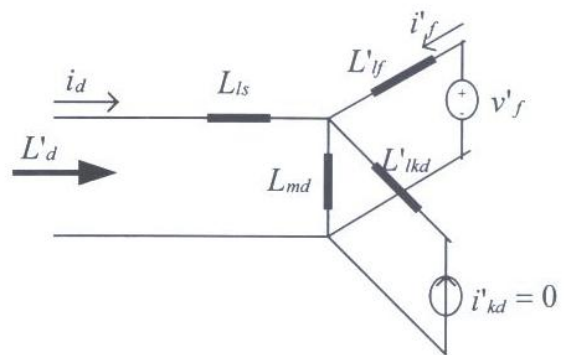


圖 2 · 暫態 d 軸等效電路

隨著阻尼效應使得感應電流的快速衰減，所以到暫態階段，僅剩下前述之暫態響應電流。暫態電流感應在轉子線圈上，磁通鏈將維持在每一個線圈電路之初始值。在 d 軸上轉子之磁通鏈亦維持在初始值，即  $\Delta \lambda'_{kd} = \Delta \lambda'_f = 0$ ，並得到下式：

$$\begin{aligned}\Delta \lambda'_f &= L_{md} \Delta i_d + L'_{ff} \Delta i'_f + L_{md} \Delta i'_{kd} = 0 \\ \Delta \lambda'_{kd} &= L_{md} \Delta i_d + L_{md} \Delta i'_f + L'_{kkd} \Delta i'_{kd} = 0\end{aligned}\quad \text{式 12}$$

上式推導出電機的次暫態電感  $L''_d$ ，與暫態電感  $L'_d$  比較分析，則次暫態電感  $\ll$  暫態電感。因為次暫態的電感量小，所以次暫態電抗值亦小，因此短路電流的初始值較暫態值為高。在次暫態時期場繞電路與阻尼電路上，都因磁通而產生電流，因為增加了  $\Delta \lambda'_{kd}$  及  $\Delta \lambda'_f$  的變化，故可配合 dq 軸座標將下式轉換為矩陣較為清楚，利用式中之  $\Delta i_d$  可快速的改變轉子電流。

$$\begin{bmatrix} \Delta i'_f \\ \Delta i'_{kd} \end{bmatrix} = \frac{-L_{md} \Delta i_d}{L'_f L'_{kkd} - L_{md}^2} \begin{bmatrix} L'_{kkd} - L_{md} \\ L_{md} \end{bmatrix} = \frac{-L_{md} \Delta i_d}{L'_f L'_{kkd} - L_{md}^2} \begin{bmatrix} L'_{kd} \\ L'_f \end{bmatrix}\quad \text{式 13}$$

在 d 軸上符合定子磁通鏈的變化的方程式是：

$$\Delta \lambda_d = L_d \Delta i_d + L_{md} \Delta i'_f + L_{md} \Delta i'_{kd} \quad \text{式 14}$$

將前兩式帶入以及定義  $\Delta i_d$ 、 $\Delta \lambda_d$  之比例是 d 軸之次暫態電抗  $L''_d$ ，可得到下式：

$$L''_d = \frac{\Delta \lambda_d}{\Delta i_d} = L_s + \frac{L_{md} \frac{L'_{kd} L'_f}{L'_{kd} + L'_f}}{L_{md} + \frac{L'_{kd} L'_f}{L'_{kd} + L'_f}} \quad \text{式 15}$$

上述之方程式利用戴維寧 (Thevenin's) 等效電路，可顯示在 d 軸

上的次暫態電感係來自轉子與定子的  $L_s$  串聯及並聯  $L_{md}$ 、 $L'_f$ 、 $L'_{kd}$  電感之組合 (參考圖 4)。

同理可推導出 q 軸上的次暫態電感，當  $\Delta \lambda_q / \Delta i_q = L''_q$  時，

$$L''_q = L_s + \frac{L_{mq} \frac{L'_{kq} L'_{lg}}{L'_{kq} + L'_{lg}}}{L_{mq} + \frac{L'_{kq} L'_{lg}}{L'_{kq} + L'_{lg}}} \quad \text{式 16}$$

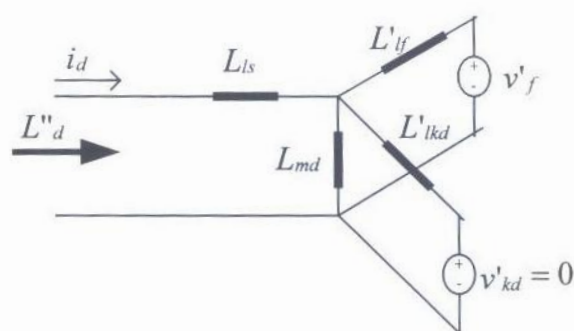


圖 3 · 次暫態 d 軸等效電路

由上述的分析中，因阻尼繞組導體中磁場的改變而導致的感應電流，稱作渦電流 (Eddy Current)，是有別於定子繞組導體中流動的電流。

#### (4) 暫態時間常數

旋轉電機轉子上是由兩個繞組之集合所組成，通常阻尼繞組的電阻值較場繞組為高，故場繞組與阻尼繞組具有不同的時間常數。場繞組的集合時間常數屬於較大值，稱為暫態時間常數；阻尼繞組之集合響應出較小值的時間常數，是為次暫態時間常數，因此阻尼繞組與次暫態時間常數有密切的關係。

當定子側開路時，阻尼繞組上呈現出較高阻抗的效應，故可將其忽略之。當激磁電壓產生變化時，場電流

亦有對應的變化，而場電流的變量係受開路之場時間常數所控制。d-q 軸之暫態時間常數定義如下式：

$$T_{do}' = \frac{\Delta L_{ff}'}{r_f'} \quad \text{式 17}$$

$$T_{qo}' = \frac{\Delta L_{gg}'}{r_g'}$$

典型的  $T_{do}'$  其時間在 2 秒-11 秒之間，比其他的時間常數要長。無論如何，當場繞組及定子繞組在短路的情況下，阻尼繞組的影響是可被忽略的，同時，場繞組的視在電感 (apparent inductance) 的變異量與外部連接的情況有關。

時間常數之比率敘述如下；在定子繞組短路以及開路的條件中，場繞組具有不同的視在電感；此視在電感亦可在場繞組短路或是開路的條件中，由定子電流觀之。在 d 軸上時間常數的比率等於  $(L_d'/L_d)$ ，所以，此場繞組的時間常數在上述狀況下產生出的關係式如下：

$$\frac{T_{do}'}{T_{do}} = \frac{L_d'}{L_d} \quad \text{式 18}$$

利用

$$\frac{L_{md}'}{L_f'} = \frac{L_d' - L_b'}{L_d' - L_b'} \text{ 及 } L_{md}' = L_d' - L_b'$$

$$L_{ff}' = \frac{(L_d' - L_b')(L_d' - L_b')}{(L_d' - L_d')}$$

在此亦可將式 21 展開為 d 軸上的時間常數：

$$T_{do}' = \frac{1}{r_f'} \left( \frac{(L_d' - L_b')^2}{(L_d' - L_d')} \right) \quad \text{式 19}$$

#### (5) 次暫態時間常數

在場繞組的端點“f”是短路及定子繞組為開路的條件中，次暫態時間常數“ $T_{do}''$ ”決定了阻尼繞組上的電流。一瞬間中的次暫態時間常數其定義說明

如下，初始條件是旋轉電機在額定速度下運轉，當電樞端短路時，電機之額定速度驟然消失，電樞上的對稱電壓快速減少到  $(1/e)$  的初始值。開路時的定子電壓是次暫態衰減週期之初始值，此時場繞組的電阻是可忽略的。在電流流動在 kd 阻尼繞組上，所產生之等效電感以下式表之：

$$L_{kd0}'' = L_{kd}'' + \frac{1}{r_f'} \frac{L_{md}' L_{ff}'}{L_{md}' + L_{ff}'} \quad H \quad \text{式 20}$$

$$T_{d0}'' = \frac{L_{kd0}''}{r_{kd}''} \quad s \quad \text{式 21}$$

在定子開路的狀態下  $i_d=0$  與 d 軸上的磁通鏈的關係，並證明受 kd 阻尼繞組電流影響的次暫態時間常數，

$$L_{kd}'' = L_{kd}'' + \frac{L_{ff}' \left( \frac{L_{ls} L_{md}'}{L_{ls} + L_{md}'} \right)}{L_{ls} + \left( \frac{L_{ls} L_{md}'}{L_{ls} + L_{md}'} \right)} \quad \text{式 22}$$

$$T_d'' = \frac{L_{kd}''}{r_{kd}''} \quad \text{式 23}$$

#### (6) 高階模型

在此特別考慮電機轉子之集總電路，集總電路中應包含場繞組、組尼繞組以及鍛造的實體鐵心。因此，計算值、模擬值需要修正才能與電機之動態量測值互相符合。因為電機機械動態模擬能力的進步與改良，可深入暫態響應問題的核心，分析定子、轉子集總電路及轉子震動產生之搖擺穩定度的問題。以精緻的 d 軸模型結構改善應用技術，可進一步地決定旋轉電機的參數並獲得較佳的協調。依據轉子結構，對在阻尼繞組上流動的電流及感應到鐵心上的渦電流具有遮蔽效應 (Shield Effects)，其重點在於遮蔽



效應對電機轉子的暫態特性之影響。

回顧以低階模型中的階梯式的網路，所完成電機之近似模型，在網路之 RL 分路上，必須調和沿著轉子表面阻抗所衍生出複雜的頻譜響應。其次，可以傳統的角度綜合轉子物理性的結構，將電流之路徑作適當的分割處理，即場電流與阻尼電流。在物理性的磁場及阻尼電路之旁，可以加上第三個電路，此電路即為在轉子電極表面所感應出的渦電流；這三個電流流動的路徑與轉子齒槽非常地靠近。圖 4 說明齒槽漏磁通(Slot Leakage Flux)成分，在轉子齒槽中耦合出兩條或是更多的電流路徑。場電流之路徑在齒槽中較深的部位，它鏈結(Links)起所有在齒槽上的漏磁通成分；第二條電流路徑是結合齒槽上層之阻尼線圈電流，它鏈結著交叉其上方的  $\phi_{r1c}$  部分和全部的  $\phi_{r2c}$ ；第三組電流路徑是結合流經轉子電極(Pole)表面的渦電流，它不包含  $\phi_{r1c}$  僅與部分的  $\phi_{r2c}$  鏈結。

利用磁路和電路之間的關係，說明在轉子上流過分路上的電流造成了磁場，分路本身亦有自感  $L$ 。如果某一分路所造成的磁場在其他分路上產生磁通鏈時，則此二分路之間存在著一互感  $M$ 。每一個磁通分路成分耦合兩個或是多個電路，這些電路可以轉換成一個互感電感，這個等效電路可以作為轉子等效電路的互感。因此可將轉子上的各個電流分路及其相互之間的耦合磁通量，轉換成一個等效互感。圖 5 說明精簡的 qd0 軸電路模型中轉子在 qd 軸上各有三個電路。在轉子齒槽上的  $\phi_{r1c}$  及  $\phi_{r2c}$  的磁通量，耦合產生出電感  $L_{r2c}$  及  $L_{r1c}$ 。 $L_{1c}$ 、 $L_{2c}$ 、 $L_{3c}$

三電感則是來自場電流、阻尼電流及渦電流三者的漏磁通。我們亦可注意到，在雙屬籠式感應機的轉子上亦有相同的特性與分析方法。

發展動態阻抗的量測方法，以決定電機的參數，頻率響應試驗用以調和電機停頓及運轉中的頻率適應範圍，改善試驗方法及轉換函數的準確度，兩者是同等的要。圖 5 說明轉子之間不相等的互感，是使用量測及轉換函數之方法計算出來的。

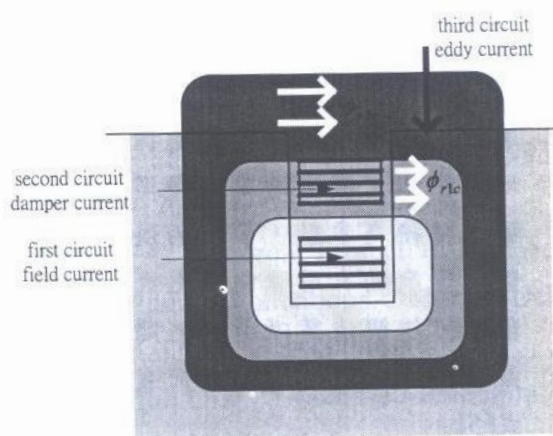


圖 4 · 轉子齒槽耦合磁通之三電流路徑

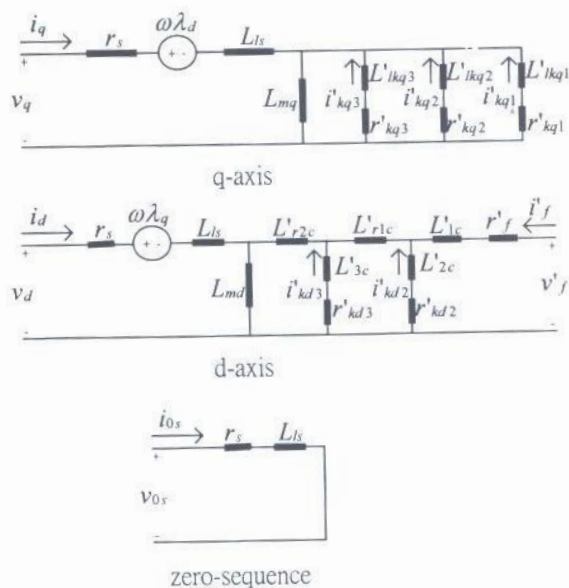


圖 5 · d 軸漏磁耦合之高階模型

## (7) 方程式之模擬

以等效電路及方程式說明定子與轉子之間的互感及耦合電感，以及維持在 d 軸轉子電路上的磁通鏈  $\psi_{mq}$ 、 $\psi_{dq}$ ，d-q-o 軸上的轉子等效電路如圖 6，d 軸上的三個轉子電路其互感耦合的磁通鏈方程式，可以寫成矩陣的形式：

$$\begin{bmatrix} \psi_{w1} - \psi_w \\ \psi_{w2} - \psi_w \\ \psi_f - \psi_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_w + x_{z1}) & x_{z2} & x_{z3} \\ x_{z1} & (x_{z1} + x_{r1} + x_{z1}) & (x_{z1} + x_{z2}) \\ x_{z3} & (x_{z1} + x_{z2}) & (x_{z1} + x_{r1} + x_{z1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{w1} \\ i_{w2} \\ i_f \end{bmatrix}$$

式 24

一個良好的電機模型必須具備適當性及匹配性，首先要選擇電路適當地表示法，其次將電機頻率響應的試驗值轉換為參數，參數的決定是發展頻率響應的有用資訊。上式之矩陣方程式可說明清楚磁通鏈之間的關係，並獲得在 d-q-o 軸上的代表性的方程式[5]。

## 伍、三相對稱故障對轉子溫昇之影響

假設同步發電機於額定輸出及同步運轉的條件中，模擬電樞端於 50 sec 時間軸上，發生三相短路障。保護電驛及斷路器於 300 ms 之動作時間內清除故障後，延續電樞電流與場電流波形之記錄至 52.5sec。並依據模擬之波形，檢討故障電流及場電流在動態響應中，對轉子感應渦電流的影響，如圖 6 所示；

圖 6 顯示電機外部發生三相對稱短路事故時，其電樞與轉子電流兩者均發生嚴重之擾動，注意轉子繞組上的暫態感應電流，其振幅約大於額定電流 3pu，且在多重阻尼震盪後逐漸恢復穩定。經由動態方程式的推導以及模擬結果顯示，運轉中的

電機無論遭受對稱故障或是非對稱故障，均可於場繞組、阻尼繞組及鐵心上產生感應電流，可能於電機轉子產生出過度溫昇之結果。

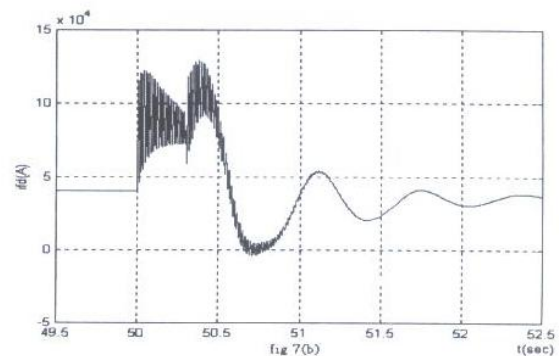
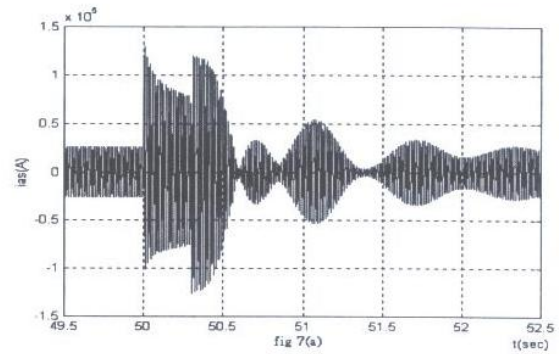


圖 6. 在 50sec，發生三相短路故障且在 300ms 後清除故障。

(a) a 相電流波形、  
(b) 場電流波形。

## 陸、結 論

無論電機提供對稱及非對稱故障電流，保護電驛動作斷路器清除故障的故障持續時間，即為發電機發生震盪的時間。在此時期中，機組的動態響應分別為次暫態、暫態及穩態三個時期。次暫態及暫態響應週期中，在定子與轉子間的自感及互感的交互作用下，於轉子鐵心上產生感應渦電流，此電流路徑上的阻抗產生  $I^2R$  的損失及熱量，因渦電流的頻率在導體上產生集膚效應，故渦電流路徑之導體電阻與

集膚效應成正比。換句話說；假設感應渦電流不變，集膚效應愈強烈者，電流集中在轉子表面流動其轉子表面溫昇效應就愈顯著。

溫昇對電機之絕緣性能及壽命有潛在的影響，電氣絕緣介質強度的降低是時間和溫度的函數，故電機的運轉溫度與它預期壽命有密切的關係。這種絕緣強度的降低變質是一種化學現象，包括緩慢的氧化、硬度增加導致易碎，導致機械耐性喪失和介質強度劣化。在許多情況中，變質速率影響絕緣壽命可以指數表示：絕緣壽命指數= $Ae^{B/T}$ ，其中 A 和 B 是常數，T 是絕對溫度。簡言之，每溫昇 8~10°C 將衰減 50% 的絕緣壽命。

現階段電機轉子之溫昇保護，仍以負相序過電流-時間電驛為最佳選擇，針對電機之”過電流”與”負相序過電流”保護之故障電流通路徑而言，過電流泛指在故障路徑中流動的故障電流，而負相序過電流並未脫離既定的傳輸路徑；過電流將對電機造成立即性的損壞與破壞，而負相序過電流則對絕緣材料形成老化與劣化，這是兩者相異之處。因此，負相序過電流保

護電驛具有預防潛在事故發生之性能且多規劃為電機之後衛保護。

### 參考資料：

1. Summary of the “Guide for AC Generator Protection” ANSI/IEEE C37.102-1987, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No 2, April 1989, pp957~964.
2. C. Russell Mason, “The Art and Science of Protective Relaying”, John Wiley & Sons, Inc. (April 1967), pp193~223.
3. [1]Stanley H. Horowitz, Arun G. Phadke, “Power System Relaying”, Research Studies Press LTD., (July 1993), pp155~170.
4. Walter A. Elmore, “Protective Relaying Theory and Applications”, Marcel Dekker, Inc., (1994), pp103~110.
5. Chee-Mun Ong. “Dynamic Simulation of Electric Machinery”, Prentice Hall PTR, (1998), pp 294~309.

『保護電驛』工作是一良心的責任工作