

同步电机基本参数理论 及其测定方法

王 耀 臣

科学出版社

73.2536

4

同步电机基本参数理论及其测定方法

王耀臣 编著

科学出版社

1965

內 容 簡 介

本书綜述了同步电机基本参数的理論,其中着重对橫軸同步电抗、超瞬变电抗、瞬变电抗、負序电抗、零序电抗、時間常数、頻率参数等进行了較为詳尽的闡述;对在电机运行中經常影响参数变化的若干主要因素做了分析并深入討論了某些参数的物理实质。

书中对同步电机基本参数的理論及其測定方法中的特殊問題进行了理論分析;論証、分析了原有理論計算与試驗測定方法的誤差及其校正方法,同时也提出了若干参数的新試驗測定和理論計算方法,并与已有方法进行了比較。书中所列举的全部方法都做了工业性試驗;在理論分析和工业試驗对比的基础上,对如何計算与測定同步电机基本参数問題作了討論。

本书可供从事电力系统、电机运行方面的研究人員和工程技術人員以及高等学校电力、电机系的师生参考。

同步电机基本参数理论及其測定方法

王 耀 臣 編著

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝陽門內大街117号

北京市书刊出版业营业許可証出字第061号

上海市印刷五厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

*

1965年10月第一版

开本:850×1168 1/32

1965年10月第一次印刷

印張:6 1/4

印数:0001—4,900

字数:161,000

統一书号:15031·199

本社书号:3274·15—5

定价:[科六]0.95元

序 言

发展电力工业的重要任务之一是保证电站和电力系统充分可靠地运行。为达到这一目的，必须在设计电力系统、其组成元件以及在建成后的运行中，尽可能采用新技术措施，如：改进电力系统结构、调度方式、采用新式励磁调节器、新的运行方式等等，以使系统运行更加经济可靠。

在给定的电力系统中能否成功地运用新的运行方式，诸如发电机的异步运行、自同步、非同步自动重合闸等，需要用准确的方法对电机和系统进行大量的计算。为此，除须掌握它们的一般参数外，还必须测定许多同步发电机的另一些参数。为计算在异步方式下运行的同步电机行为，除需要准确掌握电机纵轴参数外（如： x_d , x'_d , x''_d , T'_d , T''_d , T_{fd} , T_{1d} 等），还必须准确地测定出它的横轴参数。对带有实芯结构的电机来说，还必须知道它的频率参数。对这些参数测定精确度的要求，大大超过计算短路电流、系统静态和动态稳定（振荡第一周）时的要求。

为获得电机参数，已经有过许多试验测定和理论计算方法，但都不尽完善。因此，改善这些已有方法，即提出测定与校正误差的方法，以及研究新的、更加精确、简易的方法是生产和科学研究工作中急待解决的问题。

本书主要内容是阐述同步电机基本参数的理论，论证、分析试验测定与理论计算方法的主要问题并提高其精确度，研讨新的测定与计算方法。在参数理论部分，着重对其定义与物理意义作了论述。在试验测定与理论计算方法部分，着重对同步电抗、瞬变电抗、超瞬变电抗、负序电抗、零序电抗、时间常数、频率参数的理论计算与测定方法作了比较详尽的分析，并提出和论证了若干参数

的測定与計算的新方法；同时对一些原有的方法作了若干整理工作。此外，还綜述了作为本书理論分析基础的同步电机双反应原理、派克-高烈夫方程式等問題。

本书是作者研究同步电机运行方式問題时整理出来的；由于作者水平所限，难免有不当和錯誤之处，希望讀者指正。

作者

目 录

序言	iii
第一章 同步电机理論及其基本参数	1
第一节 同步电机双反应原理及派克-高烈夫方程式	1
第二节 同步电机过渡过程等值电路图及其参数	10
第三节 定子漏电抗(x_σ)	19
第四节 同步电抗(x_d, x_q)	20
第五节 超瞬变电抗(x_d'', x_q'')	22
第六节 瞬变电抗(x_d', x_q')	24
第七节 负序电抗(x_2)	27
第八节 零序电抗(x_0)	29
第九节 轉子自由电流衰减時間常数(T_d)	32
第十节 定子电流非周期分量衰减時間常数(T_d)	38
第十一节 同步电机頻率参数[$r(s), x(s), z(s)$]	39
第二章 同步电抗測定方法	42
第一节 纵軸同步电抗空載、短路特性測定法	42
第二节 横軸同步电抗矢量图測定法	46
第三节 在无励磁状态測定横軸同步电抗法	48
第四节 横軸同步电抗反向励磁測定法	49
第五节 纵、横軸同步电抗小滑差測定法	51
第六节 結論	66
第三章 定子漏电抗測定方法	68
第一节 特性曲綫測定法	68
第二节 矢量图測定法	73
第三节 轉子取出靜态測定法	73
第四节 結論	76
第四章 超瞬变电抗測定方法	77

第一节	突然短路测定法	77
第二节	稳定短路切除后电压恢复测定法	80
第三节	电机切除测定法	83
第四节	静态测定法	85
第五节	三点静态测定法	94
第六节	德古-吉克静态测定法	97
第七节	結論	99
第五章	負序与零序电抗测定方法	100
第一节	零序电抗外电源测定法	100
第二节	零序电抗两相接地短路测定法	114
第三节	零序电抗空載、单相、两相短路测定法	116
第四节	零序电抗間接测定法	118
第五节	負序电抗計算测定法	118
第六节	負序电抗异步制动测定法	119
第七节	負序电抗两相短路测定法	125
第八节	負序电抗两相短路测定法	130
第九节	負序电抗不对称运行测定法	131
第十节	負序电抗单相、两相短路测定法	132
第十一节	負序电抗两相、三相短路测定法	132
第十二节	結論	133
第六章	同步电机時間常数测定方法	134
第一节	突然短路测定法	134
第二节	电压恢复测定法	136
第三节	灭磁测定法	140
第四节	励磁回路与阻尼回路時間常数灭磁测定法	144
第五节	由轉子回路漏磁决定的時間常数誤差测算方法	146
第六节	橫軸時間常数测定法	147
第七节	結論	149
第七章	同步电机頻率参数测定方法及其理論計算	150
第一节	同步电机的頻率参数	150
第二节	同步电机异步运行及其頻率参数的基本方程式	151
第三节	同步电机頻率参数测定方法的理論分析	159

第 四 节	頻率参数分析图解测定法	161
第 五 节	同步电机頻率参数簡易测定法	167
第 六 节	考虑有电压振动时頻率参数的测定	171
第 七 节	实芯轉子汽輪发电机頻率参数的理論研究概况	173
第 八 节	隐极式同步电机轉子电阻頻率特性計算方法的理論 分析	175
第 九 节	考虑有轉子齿影响的隐极式同步电机轉子电阻頻率 特性計算方法的理論分析	183
第 十 节	結論	187
主要符号表		188
参考文献		190

第一章

同步电机理論及其基本参数

第一节 同步电机双反应原理及派克(R. Park)-高烈夫(A. A. Гопев)方程式

1.1 同步电机双反应原理的創始人是布朗德^[1](A. Blondel). 最初,这原理是用来研究同步电机稳态运行方式的. 在电机学里,通常利用双反应原理繪制凸极式同步发电机和凸极式同步电动机的矢量图. 这一原理的基础是将同步电机的磁鏈、磁通、磁动势、电流、电压分解为方向互相垂直的两个分量. 在凸极式同步电机里取其轉子纵軸(d)和橫軸(q)作为分解矢量的方向. 利用双反应原理繪出的电机矢量图叫做布朗德矢量图,見图 1.

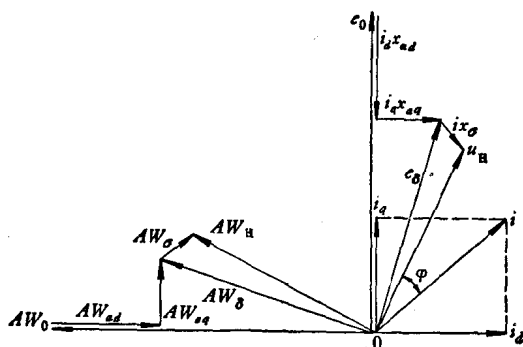


图 1 凸极式同步电机布朗德矢量图

派克^[2]曾应用了双反应原理研究和計算同步电机的过渡过程. 高烈夫^[3]亦推导出原則上和派克相同的計算同步电机过渡过

程的方程式。后者与前者不同之处仅在于所选择的矢量分解方向，即纵轴与横轴的相互垂直方向的不同而已。

在上述文献中，派克-高烈夫提出了，把同步电机机电过渡过程方程式中的一类变数以另一类变数所代替。这一方法被称为坐标变换法；所运用的坐标系叫做 $dq0$ 系统。

从数学意义上来看，坐标变换法的实质是，将电机相电流、相电压和磁链的瞬时值以相应引入的计算量的瞬时值所代替。所引入的计算值事实上是原各相电流或其他相应的物理量瞬时值的组合，例如：

$$i_d = \frac{2}{3} [i_a \cos \gamma + i_b \cos(\gamma - 120^\circ) + i_c \cos(\gamma - 240^\circ)];$$

$$i_q = \frac{2}{3} [i_a \sin \gamma + i_b \sin(\gamma - 120^\circ) + i_c \sin(\gamma - 240^\circ)];$$

$$i_0 = \frac{1}{3} [i_a + i_b + i_c].$$

从几何意义来分析这种变换时，它意味着把原有的变数矢量以其在相应的 d, q 轴系统中的投影分量所代替。

概括说来，坐标变换方法的实质是：以探索未知数量的轴向投影分量的变化规律来寻求未知数量的规律。

通过坐标变换可以把电机原机电过渡过程方程式中的周期变系数代之以常系数；如不考虑饱和对电机参数的影响，则可由原具有周期变系数的非线性微分方程式得到具有常系数的线性微分方程式，从而把方程式的解算过程大大地简化了。因此， $dq0$ 坐标变换法，即派克-高烈夫方程式是近代研究同步电机各种运行方式过渡过程的基本方法之一。

1.2 推导派克-高烈夫方程式时取下列各项假定条件：

- 1) 电机未饱和；
- 2) 磁滞现象略而不计；
- 3) 电机定子绕组对称；
- 4) 磁动势沿电机空气隙的空间分布是正弦的；

5) 定子漏电抗与其轉子位置无关。

电机轉子各輔加回路(阻尼繞組或汽輪发电机的实芯轉子)在等值电路图中均以两支模拟回路所代替,即:沿电机纵軸与横軸方向各一支。 $dq0$ 坐标系統中軸的正方向,定子繞組的軸綫,轉子旋轉方向及角度的計算示于图 2。当磁鏈的方向与坐标系統軸的正方向相重合时,磁鏈的数值为正。所有回路里的电流正方向均以右轉螺旋定律为准。电流、电势和相电压的正方向是当它們由相的末端通向始端时为准。

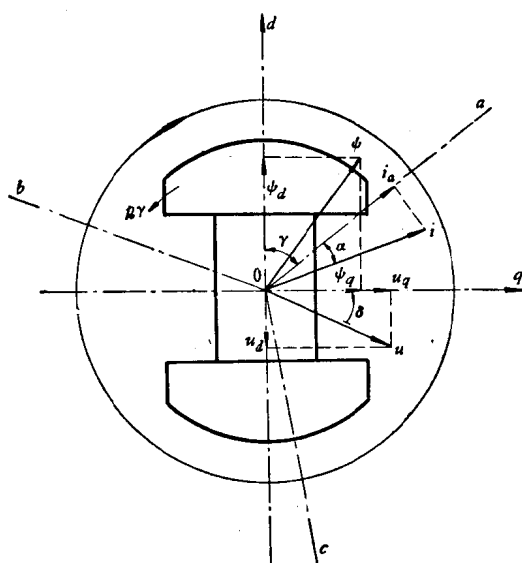


图 2 $dq0$ 坐标系統示意图

当接入电机轉子滑环的励磁机电压 u_f 产生正向励磁电流时, u_f 数值为正。

如果没有特殊注明,則所有角度均以电弧度为单位,其他所有数量单位皆为标么值,并认为轉子回路各数据皆系换算到定子侧。电机名牌数据被取为标么基础值。

由图 2 可見,在 abc 固定坐标系統中定子相电流(i_a, i_b, i_c)与綜合电流的关系是:

$$\left. \begin{aligned} i_a &= i \cos \alpha; \\ i_b &= i \cos \left(\alpha - \frac{2}{3} \pi \right); \\ i_c &= i \cos \left(\alpha + \frac{2}{3} \pi \right). \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

如將綜合電流矢量由 abc 固定坐標系統變換到在空間以同步速度旋轉的 $dq0$ 坐標系統時，可得出：

$$\begin{aligned} & i_a \cos \gamma + i_b \cos \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right) + i_c \cos \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right) \\ &= i \left[\cos \alpha \cos \gamma + \cos \left(\alpha - \frac{2}{3} \pi \right) \cos \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right) \right. \\ & \quad \left. + \cos \left(\alpha + \frac{2}{3} \pi \right) \cos \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right) \right] \\ &= \frac{3}{2} i \cos (\alpha - \gamma) = \frac{3}{2} i_d; \end{aligned} \quad (1.2)$$

則電流 i 的縱軸分量為：

$$i_d = \frac{2}{3} \left[i_a \cos \gamma + i_b \cos \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right) + i_c \cos \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right) \right]. \quad (1.3)$$

以相同步驟可得出其橫軸分量，即：

$$i_q = \frac{2}{3} \left[i_a \sin \gamma + i_b \sin \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right) + i_c \sin \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right) \right]. \quad (1.4)$$

如發電機中心點接地，其零序電流為：

$$i_0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c). \quad (1.5)$$

和相電流相類似，可寫出相應的電壓、磁鏈的變換表示式。

由 $dq0$ 坐標系統向 abc 坐標反變換時，可通過解算上列方程式 (1.3), (1.4), (1.5) 求得 i_a , i_b , i_c 或其他相關數據，例如：

$$\begin{aligned} i_0 + i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma &= \frac{1}{3} i_a (1 + 2 \cos^2 \gamma + 2 \sin^2 \gamma) \\ &+ \frac{1}{3} i_b \left[1 + 2 \cos \gamma \cos \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right) + 2 \sin \gamma \sin \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right) \right] \\ &+ \frac{1}{3} i_c \left[1 + 2 \cos \gamma \cos \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right) + 2 \sin \gamma \sin \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right) \right]. \end{aligned}$$

由于

$$\frac{1}{3}(1+2\cos^2\gamma+2\sin^2\gamma)=1;$$

$$\frac{1}{3}\left[1+2\cos\gamma\cos\left(\gamma-\frac{2}{3}\pi\right)+2\sin\gamma\sin\left(\gamma-\frac{2}{3}\pi\right)\right]=0;$$

$$\frac{1}{3}\left[1+2\cos\gamma\cos\left(\gamma+\frac{2}{3}\pi\right)+2\sin\gamma\sin\left(\gamma+\frac{2}{3}\pi\right)\right]=0;$$

則

$$i_a = i_0 + i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma. \quad (1.6)$$

与 A 相电流相类似可得 b, c 相电流如下:

$$i_b = i_0 + i_d \cos\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) + i_q \sin\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right); \quad (1.7)$$

$$i_c = i_0 + i_d \cos\left(\gamma + \frac{2}{3}\pi\right) + i_q \sin\left(\gamma + \frac{2}{3}\pi\right). \quad (1.8)$$

以相同步骤可得出电压、磁链方程式。由此例可见坐标变换法的互换性了。

如定子绕组的电流为 i , 则其出口端电压的平衡方程式是:

$$-\frac{d\psi}{dt} = u + ir; \quad (1.9)$$

则定子 A 相的电压平衡方程式为:

$$u_a = -\frac{d\psi_a}{dt} - i_a r. \quad (1.10)$$

将 dq0 坐标系统的电流, 电压及磁链方程式代入式(1.10):

$$\begin{aligned} u_0 + u_d \cos \gamma + u_q \sin \gamma + i_0 r + r i_d \cos \gamma + r i_q \sin \gamma \\ + \frac{d(\psi_0 + \psi_d \cos \gamma + \psi_q \sin \gamma)}{dt} = 0. \end{aligned}$$

令 $p = \frac{d}{dt}$; p 是算子, 则

$$\begin{aligned} u_0 + p\psi_0 + r i_0 + (u_d + p\psi_d + p\gamma\psi_q + r i_d) \cos \gamma \\ + (u_q + p\psi_q - p\gamma\psi_d + r i_q) \sin \gamma = 0. \end{aligned} \quad (1.11)$$

方程式(1.11)可用下列形式写出:

$$A + B \cos \gamma + C \sin \gamma = 0. \quad (1.12)$$

方程式(1.12)成立的必要条件是:

$$A = B = C = 0;$$

則 $dq0$ 坐标系統的定子电压方程式为:

$$\left. \begin{aligned} u_0 &= -p\psi_0 - r i_0; \\ u_d &= -p\psi_d - \psi_q p\gamma - r i_d; \\ u_q &= -p\psi_q + \psi_d p\gamma - r i_q. \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

方程式組(1.13)被称之为派克-高烈夫方程式¹⁾.

在式(1.13)中, $p\psi_q$ 和 $p\psi_d$ 称为交变电势; $\psi_d p\gamma$, $\psi_q p\gamma$ 称为旋轉电势.

为計算同步电机机电与电磁过渡过程,除定子电压方程式外,尚須具备轉子励磁回路和阻尼回路的方程式,它們是:

$$\left. \begin{aligned} p\psi_f + r_f i_f &= u_f; \\ p\psi_{1d} + r_{1d} i_{1d} &= 0; \\ p\psi_{1q} + r_{1q} i_{1q} &= 0. \end{aligned} \right\}$$

令发电机中心点不接地 ($i_0=0$), 轉速恒定 ($p\gamma=1$), 則計算同步电机过渡过程的全派克-高烈夫方程式为:

$$\left. \begin{aligned} -p\psi_d - \psi_q - r i_d &= u_d; \\ -p\psi_q + \psi_d - r i_q &= u_q; \\ p\psi_f + r_f i_f &= u_f; \\ p\psi_{1d} + r_{1d} i_{1d} &= 0; \\ p\psi_{1q} + r_{1q} i_{1q} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

用电流和电抗表示磁鏈时,則

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= x_d i_d + x_{afd} i_f + x_{ad1d} i_{1d}; \\ \psi_q &= x_q i_q + x_{aq1q} i_{1q}; \\ \psi_f &= x_{afd} i_d + x_{ffd} i_f + x_{f1d} i_{1d}; \\ \psi_{1d} &= x_{ad1d} i_d + x_{f1d} i_f + x_{11d} i_{1d}; \\ \psi_{1q} &= x_{aq1q} i_q + x_{11q} i_{1q}. \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

1) 派克推导的方程式中 (+) (-) 符号排列与式(1.13)有所不同; 这是由于派克在 $dq0$ 坐标系統中, 採用了橫(q)軸超前縱(d)軸的結果.

将式(1.15)代入式(1.14)后,可得出:

$$\left. \begin{aligned} &-(r+px_d)\dot{i}_d - p(x_{af}\dot{i}_f + x_{a1d}\dot{i}_{1d}) - x_q\dot{i}_q - x_{a1q}\dot{i}_{1q} = u_d; \\ &-(r+px_q)\dot{i}_q - px_{a1q}\dot{i}_{1q} + x_d\dot{i}_d + x_{af}\dot{i}_f + x_{a1d}\dot{i}_{1d} = u_q; \\ &(r_f+px_{ff})\dot{i}_f + p(x_{af}\dot{i}_d + x_{f1d}\dot{i}_{1d}) = u_f; \\ &(r_{1d}+px_{11d})\dot{i}_{1d} + p(x_{a1d}\dot{i}_d + x_{f1d}\dot{i}_f) = 0; \\ &(r_{1q}+px_{11q})\dot{i}_{1q} + px_{a1q}\dot{i}_q = 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

方程式(1.16)是一組常系数綫性微分方程式。

通常解这一組方程式时,均略掉定子电阻 r ; 如拟計其影响,須将解算后和定子电流有关的各项內引入乘数 e^{-t/T_a} 即可 (T_a 的定义見本章第十节)。在以下各章节內,皆采用了上述原則进行分析的。

为便利引用起見,特將該組方程式的解算过程簡述如下:

以电流纵軸分量为未知数解方程式 (1.16), 可得出下列运算方程式:

$$i_d(p) = \frac{u_d(p) - px_d(p)}{(1+p^2)x_d(p)} - \frac{G(p)}{x_d(p)} u_f(p); \quad (1.17)$$

$x_d(p)$ 通常称之为纵軸运算阻抗,

$$x_d(p) = x_d - \frac{p^2(x_{af}^2x_{11d} - 2x_{af}x_{a1d}x_{f1d} + x_{a1d}^2x_{ff}) + p(x_{a1d}^2r_f + x_{af}^2r_{1d})}{p^2(x_{ff}x_{11d} - x_{f1d}^2) + p(x_{11d}r_f + x_{ff}r_{1d}) + r_fr_{1d}}. \quad (1.18)$$

$G(p)$ 是电导的运算式或叫做运算电导,

$$G(p) = \frac{x_{af}r_{1d} + p(x_{af}x_{11d} - x_{a1d}x_{f1d})}{p^2(x_{ff}x_{11d} - x_{f1d}^2) + p(x_{11d}r_f + x_{ff}r_{1d}) + r_fr_{1d}}. \quad (1.19)$$

若將式(1.18)和(1.19)中的电抗代之以時間常数,則可改寫为:

$$\begin{aligned} x_d(p) &= x_d \frac{p^2\sigma_{f1d}T_fT_{1d} + p(T_f + T_{1d}) + 1}{p^2\sigma_{f1d}T_{f0}T_{1d0} + p(T_{f0} + T_{1d0}) + 1} \\ &= x_d \frac{(1+pT'_d)(1+pT''_d)}{(1+pT'_{d0})(1+pT''_{d0})}; \end{aligned} \quad (1.20)$$

$$G(p) = \frac{x_{afd}r_{1d} + p(x_{afd}x_{11d} - x_{a1d}x_{f1d})}{r_f r_{1d}(1 + pT'_{d0})(1 + pT''_{d0})}. \quad (1.21)$$

将式(1.20), (1.21)代入式(1.17)后,可得出电流纵轴分量的运算式为:

$$\begin{aligned} i_d(p) = & \frac{[u_q(p) - pu_d(p)](1 + pT'_{d0})(1 + pT''_{d0})}{x_d(1 + p^2)(1 + pT'_{d0})(1 + pT''_{d0})} \\ & - \frac{[x_{afd}r_{1d} + p(x_{afd}x_{11d} - x_{a1d}x_{f1d})]u_f(p)}{x_d r_f r_{1d}(1 + pT'_{d0})(1 + pT''_{d0})}. \end{aligned} \quad (1.22)$$

以完全相同步骤,可得出定子电流横轴分量的运算式.

$$i_q(p) = -\frac{[pu_q(p) + u_d(p)](1 + pT''_{q0})}{x_q(1 + p^2)(1 + pT''_{q0})}. \quad (1.23)$$

1.3 在 1.2 中推导出的派克-高烈夫方程式,由于假定条件的限制,只能考虑因电机纵横轴磁阻的不同而产生的时间谐波,而对在非对称运行方式下产生的电机磁场高次空间谐波影响,并未考虑在内.

为便于计算非对称运行方式下电机的过渡过程,在文献[4—6]中对派克-高烈夫方程式曾做过一些补充,简要介绍如下.

如前所述,在派克-高烈夫(即 $dq0$) 坐标变换系统中,电流纵横轴分量的表示式是:

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} \left[i_a \cos \gamma_a + i_b \cos \left(\gamma_a - \frac{2}{3} \pi \right) + i_c \cos \left(\gamma_a + \frac{2}{3} \pi \right) \right]; \\ i_q &= \frac{2}{3} \left[i_a \sin \gamma_a + i_b \sin \left(\gamma_a - \frac{2}{3} \pi \right) + i_c \sin \left(\gamma_a + \frac{2}{3} \pi \right) \right]; \\ i_0 &= \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c) \end{aligned} \right\} \quad (1.24)$$

或

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} (i_a \cos \gamma_a + i_b \cos \gamma_b + i_c \cos \gamma_c); \\ i_q &= \frac{2}{3} (i_a \sin \gamma_a + i_b \sin \gamma_b + i_c \sin \gamma_c). \end{aligned}$$

在非对称稳定短路运行方式下, i_d , i_q 将由定值分量和以不同

頻率脉動的變值分量所組成。為便于分辨起見，將前者以 A_d, A_q 表示，后者以 $\Delta a_d, \Delta a_q$ 表示，則

$$i_d = A_d + \Delta a_d;$$

$$i_q = A_q + \Delta a_q.$$

由定、轉子電流決定的縱橫軸磁鏈，在非對稱短路下并非是電機的全部磁鏈。當考慮到由定子電流脉動分量在勵磁繞組和阻尼繞組內感应的電流所產生的互感磁通時，則電機的全部磁鏈為：

$$\left. \begin{aligned} \psi_{d\pi} &= i_d x_d + x_{afd} i_f + x_{a1d} i_{1d} + x_{afd} \Delta i_f + x_{a1d} \Delta i_{1d} \\ &= \psi_{fm} + i_d x_d + x_{afd} \Delta i_f + x_{a1d} (\Delta i_{1d} + i_{1d}); \\ \psi_{q\pi} &= i_q x_q + x_{aq} i_{1q} + x_{a2q} \Delta i_{1q}, \end{aligned} \right\} \quad (1.25)$$

這裡， $x_{afd} \Delta i_f$ 是表示定子電流脉動分量所決定的勵磁繞組互感磁通；而 $x_{a1d} \Delta i_{1d}$ 為阻尼繞組互感磁通。

若電機轉子內無阻尼繞組時，

$$\psi_{d\pi} = \psi_{fm} + A_d x_d + \Delta a_d x_d + x_{afd} \Delta i_f. \quad (1.26)$$

如將勵磁繞組電阻 r_f 略而不計，則由勵磁繞組的感應電流所決定的電壓平衡方程式為：

$$x_{ffd} \frac{d\Delta i_f}{dt} + x_{afd} \frac{d\Delta a_d}{dt} = 0;$$

從而

$$\Delta i_f = -\frac{x_{afd}}{x_{ffd}} \Delta a_d. \quad (1.27)$$

將式(1.27)代入式(1.26)得：

$$\begin{aligned} \psi_{d\pi} &= \psi_{dm} + A_d x_d + \Delta a_d \left(x_d - \frac{x_{afd}^2}{x_{ffd}} \right) \\ &= \psi_{dm} + A_d x_d + \Delta a_d x'_d. \end{aligned} \quad (1.28)$$

以相同步驟可得出具有阻尼繞組的電機全磁鏈方程式如下：

$$\left. \begin{aligned} \psi_{d\pi} &= \psi_{fm} + A_d x_d + \Delta a_d x''_d; \\ \psi_{q\pi} &= A_q x_q + \Delta a_q x''_q, \end{aligned} \right\} \quad (1.29)$$

則定子各相磁鏈方程式為：