

同步电机綫性振荡理论

И. Д. 烏魯索夫

科学出版社

73.2536
487

同步电机綫性振荡理论

И. Д. 烏魯索夫 著

黃 煥 焜 譯

27611/12
(27611/33)

斜 124 4 版 註

1981.4.1

И. Д. УРУСОВ
ЛИНЕЙНАЯ ТЕОРИЯ КОЛЕБАНИЙ
СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Издательство Академии наук СССР
1960

內 容 簡 介

本书叙述了同步电机振荡的綫性化理論基础，分析了同步电机在強迫振荡和自由振荡下的行为以及自动調节励磁对电机振荡的影响，并討論了异步运行的計算方法。

本书可供从事电机和电力系统方面的研究人員、工程技術人員以及高等学校的教师和学生参考。

同步电机綫性振荡理論

И. Д. УРУСОВ 著
黃 煥 焜 譯

科学出版社出版 (北京朝陽門大街 117 号)
北京市书刊出版业营业許可證出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

1964 年 6 月第 一 版 书号: 2959 字数: 123,000
1964 年 6 月第一次印刷 开本: 850×1168 1/32
(京) 0001—6,000 印张: 4 13/16

定价: [科七] 0.85 元

序 言

对于苏共第二十一次代表大会所拟定的电气化总计划，苏共中央六月全会的决议已经指出了具体方向，这些决议向苏联科学界提出了一系列有关生产过程自动化的重要任务。

本书的目的在于研究同步电机的振荡理论基础，这种研究能够阐明自动调节励磁对同步电机几个重要运行特性和指标的影响，这些特性和指标是决定同步电机运行的可靠性和设备的经济性的。按照这一理论所作的计算证明：设备性能的显著改善和电机本身结构的改进的可能性是存在的。在个别情况下，可以简化某些复杂而不很可靠的结构环节、显著减轻设备重量、改善所产生的电能质量和减少损耗。

本书不拟对本问题作全面的探讨，而只是打算把同步电机振荡问题初步加以系统化和作出科学的概括；因此，难免存在着许多缺点。对这些缺点的指正，作者将很感激。

最后，对 М. П. 科斯琴柯 (Костенко) 院士给予的许多宝贵意见和指示，В. Ф. 费托罗夫 (Федоров) 和 Р. Х. 萨菲乌琳娜 (Сафиуллина) 工程师在实验和计算工作中给予巨大的帮助，作者均在此表示深切的感谢。

目 录

序言	v
緒論	1
第一章 同步电机的基本关系	3
§ 1. 分析方法	3
§ 2. 坐标变换	5
§ 3. 运算电抗和导納	11
§ 4. 通用矢量及其間的关系	18
§ 5. 同步电机的轉矩	22
§ 6. 功率迭加原理	24
§ 7. 轉子运动微分方程式的两种写法	28
第二章 考虑人工阻尼时同步电机強迫振蕩的分析	31
§ 1. 矢量关系	31
§ 2. 在強迫振蕩时 $M(\Delta\theta)$ 的特性	39
§ 3. 最大阻尼轉矩的条件	41
§ 4. 定子电流的分析	43
§ 5. 計算-实验的研究	46
§ 6. 工业上采用人工阻尼在技术經濟上的合理性	55
第三章 考虑人工阻尼时同步电机轉子自由振蕩的分析	60
§ 1. 稳定性的判据和过程的定性研究	62
§ 2. 按轉矩頻率特性 $M(p)$ 决定多項式 $L(p)$ 的根	65
§ 3. 按給定的振蕩衰减情况决定系数 c_1 和 c_2	70
§ 4. 阻尼品質的物理判据	71
§ 5. 振蕩过程的矢量图	73
§ 6. 考虑人工阻尼时在振蕩情况下定子电流的分析	75
§ 7. 在 $M_{j0} < 0$ (人工稳定区)时的稳定条件	77
§ 8. 稳定性的比較計算和特征方程式根的決定	81
§ 9. 用頻率法研究稳定	84

§ 10. 按照轉矩特性 $M(p)$ 研究特征多項式的根	85
§ 11. 研究穩定時考慮定子繞組電阻的影響	86
§ 12. 在有調節勵磁的情況下自由振蕩過程實驗研究的數據	88
第四章 綫性化方程式的應用範圍	90
§ 1. 問題的根據和提出	90
§ 2. 轉子振蕩非綫性問題的研究	93
§ 3. 角度 θ 的極限偏差和 θ_0 的關係	100
§ 4. 轉子極限逸出角度 θ_m 和動態穩定儲備的關係	105
第五章 振蕩過程發生條件的分析	107
§ 1. 突然三相短路過程中的轉子運動	108
§ 2. 在有綫性增長的和恆定的制動轉矩時故障後轉子的振蕩運動	116
第六章 恆定滑差下异步運行方式的特性	125
§ 1. 準確方法	125
§ 2. 近似計算	128
§ 3. 在小滑差區域內近似地考慮定子繞組電阻的影響	133
§ 4. 啟動籠尺寸的選擇	136
§ 5. 异步運行中周期性勵磁	139
結論	142
附錄	144
參考文獻	145

緒 論

在現代動力系統中，同步电机从作为电能产生者——发电机开始，随后它在系統中間站作为无功电能产生者——同步补偿机，直到它作为同步电动机——生产机械，即电力負荷为止，同步电机的运行方式是多种多样的。動力系統容量的扩大，发电站到电力負荷之間距离的增长和生产机械工作条件的严重化等等，都将使同步电机的运行情况更为复杂，而在許多情况下还将使它的运行情况接近于稳定极限。因此，就須建立新的自动調节和自动控制装置，以保証系統运行所要求的可靠性和电能質量。

这些装置的建立虽然显著地提高稳定儲备系数而有利于動力系統的运行，但也使暫态过程的变化机理更为复杂了，并給它們的物理概念和数学分析带来許多困难。然而，正如分析和物理試驗所表明：在各种脉冲性質的外来干扰（例如发电机短路、負荷的突然增加或減少）或周期性的外来干扰（如压缩机或柴油机軸上以諧波脉动的形式出現的轉矩）的作用下，同步电机都将保持一种特有的、众所周知的特性，它决定了轉子在外来干扰发生后的运动特征。这种特性就是同步电机轉子和定子磁場軸綫之間有着类似弹性的电磁联系的存在。这种联系使轉子运动具有一种显明的振蕩性質。实际上利用自动調节或制动而得到的加于轉子的任何作用，通常是无法改变运动的基本特性的。这些作用的影响只表現在把力引入这一过程中，这些力只能在一定程度上改变弹性联系系数的数值，或者改变衰减系数的数值，而通常是足以保証装置运行的可靠性和質量的。

同步电机振蕩問題研究的第一个阶段为 1900—1930 年，在这段时期內，由于对并联运行感到兴趣而建立了同步电机強制振蕩和自由振蕩綫性理論的基本原理，并闡明了阻尼繞組作为振蕩阻

尼器的作用[李希特 (Richter), 1936 年]。后一阶段为 1930 年—1950 年, 这时期的特点是双反应理論的发展和这理論扩展到暫态过程的研究。派克 (Park) 和戈列夫 (Горев) 提出的經典著作(派克, 1929、1933 年; 戈列夫, 1950 年) 是一个可用以对同步电机振蕩理論进行更深入研究的基础。

苏联在这些工作的基础上已完成了一系列的理論研究, 从而基本上决定了在強制振蕩下的同步轉矩和异步轉矩 [柳特尔 (Лютер), 1940 年]。这些工作在同步压縮电动机和柴油发电机的計算中已得到基本的应用 [叶列麦耶夫 (Еремеев), 1935 年]。

在上述的研究工作中, 对于振蕩过程的探討都沒有考虑到調节因素, 而这些因素是会大大地改变过程的性質的。

同时, 在現代化的电力拖动和动力系統中都广泛采用了新的自动調节和稳定的技术措施, 这些措施对于振蕩过程以及因而对于裝置的运行质量和稳定性都有着决定性的影响。在对現象的特性和存在于振蕩过程与調节作用間的联系缺乏明确認識的情况下, 这些措施的应用和进一步发展将发生困难。

作者把調节因素考虑在內的綫性振蕩理論的基本原理作为自己的研究任务。这一工作只在苏联科学机构和生产单位所积累的大量的理論和实践資料的基础上才能实现。

第一章 同步电机的基本关系

§ 1. 分析方法

派克和戈列夫所提出的同步电机双反应理论的发展及这理论扩展到暂态过程的研究,已为暂态过程推导出的一套微分方程式组,这方程式组目前已成为同步电机的解析研究最普遍的方法。如试验研究所证明的,作为这一方法的基础的一般假定,即励磁特性的线性化和忽略转子和定子磁势的高次谐波,并不给分析的结果带来很大的误差。

在叙述派克-戈列夫方法之前,对问题的方法论方面稍加说明是适宜的。通常所谓派克-戈列夫方程式是指方程式组中最一般的写法,这种写法是 A. A. 戈列夫首先提出的。在转子有四个电路的情况下,这方程式组用标么值表示时可以写成(戈列夫, 1950 年)

$$\left. \begin{aligned} (r + px_d)i_d + px_{ad}i_{fd} + px_{adc}i_{cd} + \theta x_{qi}i_q + \theta x_{aq}i_{fq} + \theta x_{aqc}i_{cq} &= u_d, \\ px_{ad}i_d + (r_{fd} + px_{ffd})i_{fd} + px_{adm}i_{cd} &= u_{fd}, \\ px_{ad}i_d + px_{adm}i_{fd} + (r_{cd} + px_{cd})i_{cd} &= 0, \\ -\theta x_{di}i_d - \theta x_{ad}i_{fd} - \theta x_{adc}i_{cd} + (r + px_q)i_q + &+ px_{aq}i_{fq} + px_{aqc}i_{cq} = u_q, \\ px_{aq}i_q + (r_{fq} + px_{ffq})i_{fq} + px_{aqm}i_{cq} &= u_{fq}, \\ px_{aq}i_q + px_{aqm}i_{fq} + (r_{cq} + px_{cq})i_{cq} &= 0, \\ i_d(x_{qi}i_q + x_{aq}i_{fq} + x_{aqc}i_{cq}) - i_q(x_{di}i_d + x_{ad}i_{fd} + &x_{adc}i_{cd}) = p^2\theta T_i + M_m. \end{aligned} \right\} \quad (I, 1)$$

方程式组中最后一个方程式是转子运动方程式。如众所周知,这方程式组在一般形式下是不能解的,因为其中包含着非线性

和非齐次的因子。在这方程式組中取变量的小变分的情况下，它可以变成七个綫性齐次方程式，可以用积分法求解。但是，由于方程式組的主行列式具有高的阶次，实际上求得它的解答仍然是很困难的。

派克(1933年)提出了一种方法和一种方程形式，如果把戈列夫的方程(I, 1)中的轉子电路电流消去，而以电流 i_d 和 i_q 、磁鏈 ψ_d 和 ψ_q 以及称为运算电抗的 $x_d(p)$ 和 $x_q(p)$ 来表示的話，就可把这个方程式組化到与轉子电路数目无关的下列五个方程式：

$$\left. \begin{aligned} p\psi_d + ri_d - \psi_q p\gamma &= u_d, \\ p\psi_q + ri_q + \psi_d p\gamma &= u_q, \\ \psi_d - x_d(p)i_d &= G_d(p)u_{ld}, \\ \psi_q - x_q(p)i_q &= G_q(p)u_{lq}, \\ \psi_q i_d - \psi_d i_q &= T_j p^2 \dot{\theta} + M_m. \end{aligned} \right\} \quad (\text{I, 2})$$

上列方程式通常称为派克方程式或派克-戈列夫方程式，因为它们是从方程式組(I, 1)导出来的。

在不計或近似估計定子繞組的电阻 r 时方程式組(I, 2)的主要优点可以显示出来。在这情况下可以得到各个电路电流和轉矩的簡單运算关系式，便于研究振蕩过程。

此外，还有可能采用功率迭加原理，以便在解析的方式下将振蕩特性和异步特性进行綜合。

考虑到上述方法发展过程中已显示出的优越性和可能性，后面的分析均将以此法为根据。

由于近来对于将在第三章詳細討論的橫軸励磁問題以及較詳細地分析阻尼系統的影响問題发生兴趣，使作者不得不在第一章中給出同步电机考虑了轉子縱橫軸(d 和 q 軸)励磁的主要运算关系的推导，而且对派克首先提出的所謂功率迭加原理也作較詳細的分析。

以下我們只限于討論同步电机經外接阻抗接于无限大功率母綫的运行方式；不过，理論的基本原理和它的准則还可应用于更复杂情况的研究。

应用功率迭加原理来研究振荡的特性，可以显示出原理的普遍性和对异步运行分析的处理，在异步运行时过程的重复性会发生脉动性质的电流和转矩，这对接近同步状态的暂态过程的分析是很有意义的。

§ 2. 坐标变换

使 a 相磁场轴线与实轴重合，并以逆时针方向为角度起算的正方向时，按照复数坐标法[楊柯-突利尼茨基 (Янко-Триницкий), 1951 年] 来讨论磁势和磁键在复数平面上的数值分布是最方便的。其他各相的正相序以及转子转速的正方向也以同样的方向来规定(如图 I, 1 所示)。

在定子相电流为任意瞬时值 i_a , i_b 和 i_c 的情况下，定子电流在轴线 (B, j) 上的合成通用矢量将为

$$\mathbf{i}' = \mathbf{i}_a + \alpha \mathbf{i}_b + \alpha^2 \mathbf{i}_c, \quad (\text{I}, 3)$$

式中 $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}} = e^{j\rho}$ 为旋转算子。

要将某一坐标系变换为另一坐标系，通用矢量必须乘与矢量 $e^{j\alpha}$ 相共轭的单位矢量，这里 α 为新坐标系对旧系统的偏转角。

因而，要将不动的坐标变换到随着转子旋转的 d 和 q 坐标，相应的通用矢量要乘上复数 $e^{j\gamma}$ 。

以电流 $\mathbf{i}$ 来说，

$$\begin{aligned} \mathbf{i} &= \mathbf{i}_d + j\mathbf{i}_q, \\ \mathbf{i} &= \mathbf{i}' e^{-j\gamma} = \mathbf{i}_a e^{-j\gamma} + \mathbf{i}_b e^{-j(\gamma-\rho)} + \mathbf{i}_c e^{-j(\gamma+\rho)} = \\ &= \mathbf{i}_a \cos \gamma + \mathbf{i}_b \cos(\gamma - \rho) + \mathbf{i}_c \cos(\gamma + \rho) - \\ &\quad - j[\mathbf{i}_a \sin \gamma + \mathbf{i}_b \sin(\gamma - \rho) + \mathbf{i}_c \sin(\gamma + \rho)]. \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \mathbf{i} &= \mathbf{i}' e^{-j\gamma} = \mathbf{i}_a e^{-j\gamma} + \mathbf{i}_b e^{-j(\gamma-\rho)} + \mathbf{i}_c e^{-j(\gamma+\rho)} = \\ &= \mathbf{i}_a \cos \gamma + \mathbf{i}_b \cos(\gamma - \rho) + \mathbf{i}_c \cos(\gamma + \rho) - \\ &\quad - j[\mathbf{i}_a \sin \gamma + \mathbf{i}_b \sin(\gamma - \rho) + \mathbf{i}_c \sin(\gamma + \rho)]. \end{aligned}} \right\} (\text{I}, 4)$$

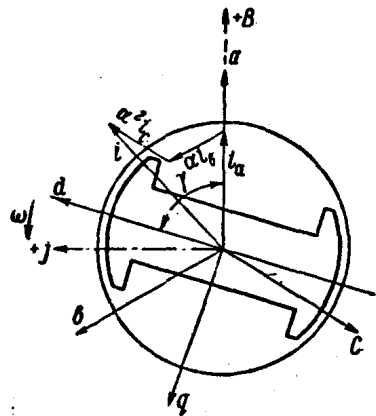


图 I, 1. 同步电机空间矢量图

1) 本章所用的黑体字为电流、电压和磁键以物理单位表示的数值。

各相电流 $\mathbf{i}_a$, $\mathbf{i}_b$ 和 $\mathbf{i}_c$ 中零序分量的存在并不影响通用矢量的数值, 因为几何和 $\mathbf{i}_0 + \alpha \mathbf{i}_0 + \alpha^2 \mathbf{i}_0 = 0$ 。按照同样的理由, 电流量 $\mathbf{i}_d$ 和 $\mathbf{i}_q$ 以及其他通用矢量 (u , ψ) 的分量, 也都同零序分量的存在无关。

轉子电路的磁势产生綜合磁鏈, 对 a 相來說, 綜合磁鏈可写成

$$\begin{aligned} \psi_a = & \psi_{r,d} \cos \gamma - \psi_{r,q} \sin \gamma + s_l \mathbf{i}_a + s_m (\mathbf{i}_b + \mathbf{i}_c) + \\ & + m_{1d} \mathbf{i}_d \cos \gamma + m_{1q} \mathbf{i}_q \cos \left(\gamma + \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \quad (\text{I}, 5)$$

式中 $\psi_{r,d}$ 和 $\psi_{r,q}$ 为 d 軸和 q 軸上由轉子电路中的电流所产生的气隙磁鏈; m_{1d} 和 m_{1q} 为 d 軸和 q 軸气隙磁通的互感系数; s_l 为每相漏磁通的自感系数; s_m 为相与相間不經气隙的部分磁鏈的互感系数。

式(I, 5)可以改写如下:

$$\begin{aligned} \psi_a = & \psi_{r,d} \cos \gamma - \psi_{r,q} \sin \gamma + s_l \mathbf{i}_a + s_m (\mathbf{i}_b + \mathbf{i}_c) + \\ & + \mathbf{i}_a \left[\left(\frac{m_{1d} + m_{1q}}{2} + \frac{m_{1d} - m_{1q}}{2} \right) \cos^2 \gamma + \right. \\ & + \left. \left(\frac{m_{1d} + m_{1q}}{2} - \frac{m_{1d} - m_{1q}}{2} \right) \sin^2 \gamma \right] + \\ & + \mathbf{i}_b \left[\left(\frac{m_{1d} + m_{1q}}{2} + \frac{m_{1d} - m_{1q}}{2} \right) \cos \gamma \cos (\gamma - \rho) + \right. \\ & + \left. \left(\frac{m_{1d} + m_{1q}}{2} - \frac{m_{1d} - m_{1q}}{2} \right) \sin \gamma \sin (\gamma - \rho) \right] + \\ & + \mathbf{i}_c \left[\left(\frac{m_{1d} + m_{1q}}{2} + \frac{m_{1d} - m_{1q}}{2} \right) \cos \gamma \cos (\gamma + \rho) + \right. \\ & + \left. \left(\frac{m_{1d} + m_{1q}}{2} - \frac{m_{1d} - m_{1q}}{2} \right) \sin \gamma \sin (\gamma + \rho) \right] = \\ = & \psi_{r,d} \cos \gamma - \psi_{r,q} \sin \gamma + s_l \mathbf{i}_a + s_m (\mathbf{i}_b + \mathbf{i}_c) + \\ & + \mathbf{i}_a \left[\frac{m_{1d} + m_{1q}}{2} + \frac{m_{1d} - m_{1q}}{2} \cos 2\gamma \right] + \\ & + \mathbf{i}_b \left[\frac{m_{1d} + m_{1q}}{2} \cos \rho + \frac{m_{1d} - m_{1q}}{2} \cos (2\gamma - \rho) \right] + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \mathbf{i}_c \left[\frac{m_{1d} + m_{1q}}{2} \cos \rho + \frac{m_{1d} - m_{1q}}{2} \cos (2\gamma + \rho) \right] = \\
& = \psi_{rd} \cos \gamma - \psi_{rq} \sin \gamma + s_l \mathbf{i}_a + s_m (\mathbf{i}_b + \mathbf{i}_c) + \\
& + \mathbf{i}_a \left[\frac{m_{1d} + m_{1q}}{2} + \frac{m_{1d} - m_{1q}}{2} \cos 2\gamma \right] + \\
& + \mathbf{i}_b \left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{m_{1d} + m_{1q}}{2} + \frac{m_{1d} - m_{1q}}{2} \cos (2\gamma - \rho) \right] + \\
& + \mathbf{i}_c \left[-\frac{1}{2} \cdot \frac{m_{1d} + m_{1q}}{2} + \frac{m_{1d} - m_{1q}}{2} \cos (2\gamma + \rho) \right] = \\
& = \psi_{rd} \cos \gamma - \psi_{rq} \sin \gamma + s_l \mathbf{i}_a + s_m (\mathbf{i}_b + \mathbf{i}_c) + \\
& + \frac{m_{1d} + m_{1q}}{2} \left(\mathbf{i}_a - \frac{\mathbf{i}_b + \mathbf{i}_c}{2} \right) + \frac{m_{1d} - m_{1q}}{2} \times \\
& \times [\mathbf{i}_a \cos 2\gamma + \mathbf{i}_b (2\gamma - \rho) + \mathbf{i}_c \cos (2\gamma + \rho)] = \\
& = \psi_{rd} \cos \gamma - \psi_{rq} \sin \gamma + s_l \mathbf{i}_a + \\
& + s_m (\mathbf{i}_b + \mathbf{i}_c) - \frac{2}{3} (s_l - s_m) \left(\mathbf{i}_a - \frac{\mathbf{i}_b + \mathbf{i}_c}{2} \right) + \\
& + \left[\frac{m_{1d} + \frac{2}{3} (s_l - s_m)}{2} + \frac{m_{1q} + \frac{2}{3} (s_l - s_m)}{2} \right] \times \\
& \times \left(\mathbf{i}_a - \frac{\mathbf{i}_b + \mathbf{i}_c}{2} \right) + \\
& + \left[\frac{m_{1d} + \frac{2}{3} (s_l - s_m)}{2} - \frac{m_{1q} + \frac{2}{3} (s_l - s_m)}{2} \right] \times \\
& \times [\mathbf{i}_a \cos 2\gamma + \mathbf{i}_b \cos (2\gamma - \rho) + \mathbf{i}_c \cos (2\gamma + \rho)] = \\
& = \psi_{rd} \cos \gamma - \psi_{rq} \sin \gamma + \frac{s_l + 2s_m}{3} (\mathbf{i}_a + \mathbf{i}_b + \mathbf{i}_c) + \\
& + \left[\frac{m_{1d} + \frac{2}{3} (s_l - s_m)}{2} - \frac{m_{1q} + \frac{2}{3} (s_l - s_m)}{2} \right] \times \\
& \times \left(\mathbf{i}_a - \frac{\mathbf{i}_b + \mathbf{i}_c}{2} \right) +
\end{aligned}$$

$$+ \left[\frac{m_{1d} + \frac{2}{3}(s_l - s_m)}{2} - \frac{m_{1q} + \frac{2}{3}(s_l - s_m)}{2} \right] \times \\ \times [\dot{\mathbf{i}}_a \cos 2\gamma + \dot{\mathbf{i}}_b \cos(2\gamma - \rho) + \dot{\mathbf{i}}_c \cos(2\gamma + \rho)]. \quad (\text{I, 5a})$$

式 (I, 5a) 两边除以空载磁链 ψ_H ,

$$\frac{\psi_a}{\psi_H} = \frac{\psi_{rd}}{\psi_H} \cos \gamma - \frac{\psi_{rq}}{\psi_H} \sin \gamma + \frac{(s_l + 2s_m)\dot{\mathbf{i}}_H}{3\psi_H} \left(\frac{\dot{\mathbf{i}}_a + \dot{\mathbf{i}}_b + \dot{\mathbf{i}}_c}{\dot{\mathbf{i}}_H} \right) + \\ + \frac{\left[\frac{3}{2} m_{1d} + s_l - s_m \right] \dot{\mathbf{i}}_H - \left[\frac{3}{2} m_{1q} + s_l - s_m \right] \dot{\mathbf{i}}_H}{3\psi_H} \times \\ \times \left(\frac{\dot{\mathbf{i}}_a}{\dot{\mathbf{i}}_H} - \frac{\dot{\mathbf{i}}_b + \dot{\mathbf{i}}_c}{2\dot{\mathbf{i}}_H} \right) + \\ + \frac{\left[\frac{3}{2} m_{1d} + s_l - s_m \right] \dot{\mathbf{i}}_H - \left[\frac{3}{2} m_{1q} + s_l - s_m \right] \dot{\mathbf{i}}_H}{3\psi_H} \times \\ \times \left[\frac{\dot{\mathbf{i}}_a}{\dot{\mathbf{i}}_H} \cos 2\gamma + \frac{\dot{\mathbf{i}}_b}{\dot{\mathbf{i}}_H} \cos(2\gamma - \rho) + \frac{\dot{\mathbf{i}}_c}{\dot{\mathbf{i}}_H} \cos(2\gamma + \rho) \right]. \quad (\text{I, 6})$$

令

$$\frac{\psi_a}{\psi_H} = \psi_a, \quad \frac{\psi_{rd}}{\psi_H} = \psi_{rd}, \quad \frac{\psi_{rq}}{\psi_H} = \psi_{rq} \quad (\text{I, 7})$$

是以空载磁链的分数表示的磁链;

$$\frac{\dot{\mathbf{i}}_a}{\dot{\mathbf{i}}_H} = i_a, \quad \frac{\dot{\mathbf{i}}_b}{\dot{\mathbf{i}}_H} = i_b, \quad \frac{\dot{\mathbf{i}}_c}{\dot{\mathbf{i}}_H} = i_c \quad (\text{I, 7a})$$

是相电流(以额定电流分数表示的);

$$\frac{(s_l + 2s_m)\dot{\mathbf{i}}_H}{\psi_H} = x_0 \quad (\text{I, 8})$$

是零序电抗(标么值);

$$\frac{\left(\frac{3}{2} m_{1d} + s_l - s_m \right) \dot{\mathbf{i}}_H}{\psi_H} = x_d \quad (\text{I, 8a})$$

是 d 軸同步电抗(标么值);

$$\frac{\left(\frac{3}{2} m_{1q} + s_l - s_m\right) \dot{i}_H}{\psi_H} = x_q \quad (\text{I, 86})$$

是 q 軸同步电抗(标么值)。

这样,从 (I, 6) 式可得磁鏈(标么值)方程式:

$$\begin{aligned} \psi_a = & \psi_{rd} \cos \gamma - \psi_{rq} \sin \gamma + x_0 \frac{i_a + i_b + i_c}{3} + \\ & + \frac{x_d + x_q}{3} \left(i_a - \frac{i_b + i_c}{2} \right) + \frac{x_d - x_q}{3} \times \\ & \times [i_a \cos 2\gamma + i_b \cos(2\gamma - \rho) + i_c \cos(2\gamma + \rho)]. \quad (\text{I, 9}) \end{aligned}$$

用类似的变换方法可得磁鏈 ψ_b 和 ψ_c :

$$\begin{aligned} \psi_b = & \psi_{rd} \cos(\gamma - \rho) - \psi_{rq} \sin(\gamma - \rho) + x_0 \frac{i_a + i_b + i_c}{3} + \\ & + \frac{x_d + x_q}{3} \left(i_b - \frac{i_a + i_c}{2} \right) + \frac{x_d - x_q}{3} \times \\ & \times [i_a \cos(2\gamma - \rho) + i_b \cos(2\gamma + \rho) + i_c \cos 2\gamma], \quad (\text{I, 10}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi_c = & \psi_{rd} \cos(\gamma + \rho) - \psi_{rq} \sin(\gamma + \rho) + x_0 \frac{i_a + i_b + i_c}{3} + \\ & + \frac{x_d + x_q}{3} \left(i_c - \frac{i_a + i_b}{2} \right) + \frac{x_d - x_q}{3} \times \\ & \times [i_a \cos(2\gamma + \rho) + i_b \cos 2\gamma + i_c \cos(2\gamma - \rho)]. \quad (\text{I, 11}) \end{aligned}$$

引用由下列簡單綫性变换所得的新变量:

$$\begin{aligned} i_d = & \frac{2}{3} \operatorname{Re}(i' e^{-j\gamma}) = \frac{2}{3} [i_a \cos \gamma + \\ & + i_b \cos(\gamma - \rho) + i_c \cos(\gamma + \rho)], \quad (\text{I, 12}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_q = & \frac{2}{3} \operatorname{Im}(i' e^{-j\gamma}) = -\frac{2}{3} [i_a \sin \gamma + \\ & + i_b \sin(\gamma - \rho) + i_c \sin(\gamma + \rho)], \quad (\text{I, 13}) \end{aligned}$$

$$i_0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c), \quad (\text{I, 14})$$

同理,

$$u_d = \frac{2}{3}[u_a \cos \gamma + u_b \cos(\gamma - \rho) + u_c \cos(\gamma + \rho)], \quad (\text{I}, 15)$$

$$u_q = -\frac{2}{3}[u_a \sin \gamma + u_b \sin(\gamma - \rho) + u_c \sin(\gamma + \rho)], \quad (\text{I}, 16)$$

$$u_0 = \frac{1}{3}(u_a + u_b + u_c) \quad (\text{I}, 17)$$

和

$$\psi_d = \frac{2}{3}[\psi_a \cos \gamma + \psi_b \cos(\gamma - \rho) + \psi_c \cos(\gamma + \rho)], \quad (\text{I}, 18)$$

$$\psi_q = -\frac{2}{3}[\psi_a \sin \gamma + \psi_b \sin(\gamma - \rho) + \psi_c \sin(\gamma + \rho)], \quad (\text{I}, 19)$$

$$\psi_0 = \frac{1}{3}(\psi_a + \psi_b + \psi_c). \quad (\text{I}, 20)$$

从坐标 $d, q, 0$ 到坐标 a, b, c 的逆变换可以按由上述关系求得的下列公式来进行,

$$i_a = i_d \cos \gamma - i_q \sin \gamma + i_0, \quad (\text{I}, 21)$$

$$i_b = i_d \cos(\gamma - \rho) - i_q \sin(\gamma - \rho) + i_0, \quad (\text{I}, 22)$$

$$i_c = i_d \cos(\gamma + \rho) - i_q \sin(\gamma + \rho) + i_0, \quad (\text{I}, 23)$$

$$u_a = u_d \cos \gamma - u_q \sin \gamma + u_0, \quad (\text{I}, 24)$$

$$u_b = u_d \cos(\gamma - \rho) - u_q \sin(\gamma - \rho) + u_0, \quad (\text{I}, 25)$$

$$u_c = u_d \cos(\gamma + \rho) - u_q \sin(\gamma + \rho) + u_0, \quad (\text{I}, 26)$$

$$\psi_a = \psi_d \cos \gamma - \psi_q \sin \gamma + \psi_0, \quad (\text{I}, 27)$$

$$\psi_b = \psi_d \cos(\gamma - \rho) - \psi_q \sin(\gamma - \rho) + \psi_0, \quad (\text{I}, 28)$$

$$\psi_c = \psi_d \cos(\gamma + \rho) - \psi_q \sin(\gamma + \rho) + \psi_0. \quad (\text{I}, 29)$$

将公式 (I, 9), (I, 10) 和 (I, 11) 所得的每相磁链表示式代入公式 (I, 18), (I, 19) 和 (I, 20), 经三角运算后即得

$$\psi_d = \psi_{rd} + i_d x_d, \quad (\text{I}, 30)$$

$$\psi_q = \psi_{rq} + i_q x_q, \quad (\text{I}, 31)$$

$$\psi_0 = i_0 x_0. \quad (\text{I}, 32)$$

§ 3. 运算电抗和导纳

在同步电机理論中，运算电抗和运算导纳的概念具有特别重要的意义和实际的应用。装置在 d 或 q 坐标轴上的电路中所进行的复杂电磁过程的特征，可以用一个变量表达出来。

直接从三绕组变压器的线路图来导出 d 轴和 q 轴上运算电抗和运算导纳的表示式和物理解释，是最具有普遍性的，而且物理意义也最为显明。

下面对轉子上有着两个电路的 d 轴关系来进行推导。在一般情况下，在轉子 q 轴上也有两个电路，其关系可以用完全类似的方法导求出来。

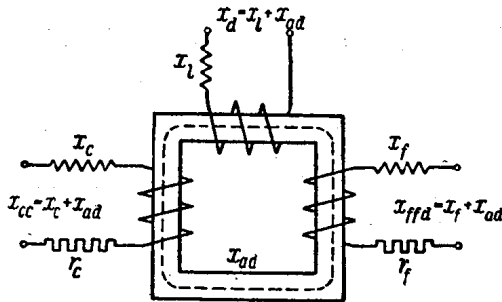


图 I, 2. 同步电机 d 轴电路的等值电路

按前所述，在 d 轴上定子磁链(图 I, 2)为

$$\psi_d = i_d x_d + i_f x_{ad} + i_{cd} x_{ad}. \quad (\text{I}, 33)$$

轉子电路的电势方程式可写为

$$e_{fd} = p i_d x_{ad} + i_f (r_f + p x_{ffd}) + p i_{cd} x_{ad}, \quad (\text{I}, 34)$$

$$0 = p i_d x_{ad} + p i_f x_{ad} + i_{cd} (r_c + p x_{cc}). \quad (\text{I}, 35)$$

这里，下角标 f 和 cd 分别表示属于励磁电路和阻尼电路的电流、电压和阻抗。以标么值表示的互感系数 x_{ad} 对所有电路均取为一样，这就是通常在实际問題中所用的假設。 p 为赫維賽特运算子。

从方程式 (I, 33), (I, 34) 和 (I, 35) 可得