

同步电机定子绕组不对称状态的分析方法

——I. 基本方程和分析方法

张龙照 王祥珩 高景德

(清华大学电机系, 北京 100084)

摘 要

发电机组容量的不断增大, 以及在结构等方面所出现的新特点, 对机组内部短路保护装置的性能提出了更高的要求, 迫切需要对同步电机定子绕组内部故障进行深入研究. 本文将首次应用多回路分析法, 在联网带载的情况下, 分析了同步电机绕组不对称问题. 在考虑电网电源的条件下, 建立了绕组不对称时的数学模型, 并提出其求解方法. 通过额定电压下的内部短路试验, 验证了所提出的方法.

关键词: 多回路分析法, 同步电机, 绕组不对称

一、引 言

同步电机定子绕组内部故障(如内部短路或开焊)是一种常见的、破坏性很强的故障. 由于大型发电机在设计、结构和运行诸方面出现了新的特点, 对内部故障保护装置的性能提出了更高的要求. 例如, 大型水轮发电机定子绕组采用了多分支分布中性点结构^[1], 取消了大电流中性点引线, 降低了端部引线发热和发电机总高度, 但也使以往的一些内部短路保护方案性能降低, 甚至不能采用. 因此, 从机组的继电保护方面来看, 急需分析同步电机定子绕组内部故障, 从理论上进一步揭示内部故障后的运行状态及各个故障特征量的变化规律, 以便评价和选用不同的保护方案, 提出和研制新型保护装置.

同步电机内部短路计算大都采用对称分量法^[2-4], 难于对问题深入研究. 相坐标法和 IFN 法^[5](即场路结合法)也不能很好地满足这方面的要求. 多回路分析法的提出, 使得交流电机绕组不对称问题的研究有了实质性的进展^[6-8]. 在分析异步电机转子不对称(如鼠笼转子断条)^[9], 多支路同步电机气隙偏移, 以及单相电机^[10]等问题时, 多回路法都有了成功的应用. 文献[11]在分析汽轮发电机定子绕组内部故障和非正常运行时, 所采用的方法与多回路法相似. 实际应用表明, 多回路法是解决绕组不对称问题的有效的方法.

文献[7]用多回路法分析了同步电机无载时定子内部故障. 可是在实际运行中, 同步电机一般均与系统相联, 同时受两组电源——励磁电源和电网电源的作用, 这显然与空载情况不同. 因此本文将在联网带载情况下, 分析定子内部故障. 与无载降压情况相比, 联网带载时有

两个主要问题需要进一步解决。第一,考虑电网电源的影响;第二,考虑铁心饱和的影响。

凸极同步电机定子绕组不对称问题具有普遍性和代表性,其它类型电机(如异步电机、单相电机、隐极同步电机)的绕组不对称问题,或者可以作为特例,或者可以按类似的方法进行研究。因此,本文的研究将以凸极同步电机为例。

二、基本假定

本文研究对象是凸极同步发电机-变压器-无穷大电网系统(参见图1),其中发电机定子每相并联分支为 n (转子部分未画出), u_{AB}^∞ 等为电网电压, K 为变压器变化,变压器用三相等值阻抗表示(图中所示变压器组别为 $Y/\Delta-1$)。

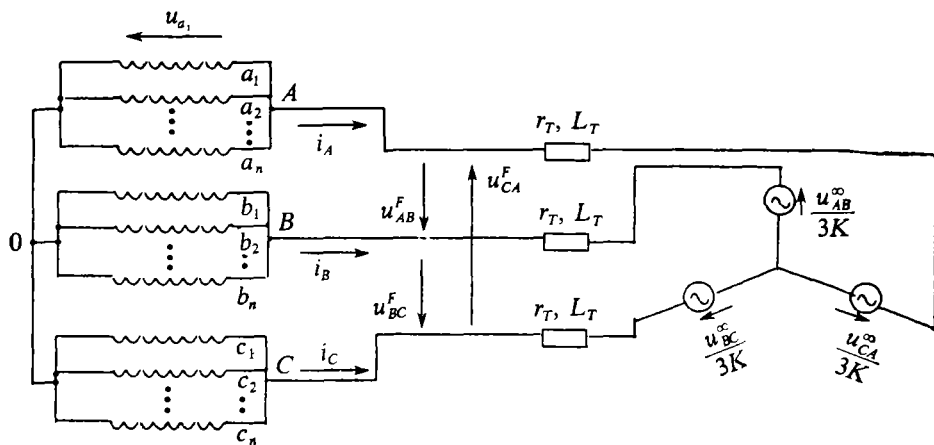


图1 同步电机-变压器-无穷大电网系统

分析时,我们作下面3个假定(不包括参数计算时的假定):

1. 电源系统的电压幅值及对称性不随负载变化,系统电压幅值已知;

2. 励磁调节器不动,稳定后励磁电流直流分量不变;

3. 调速器不动,发电机输入功率 P_1 不变。再假定电机的机械损耗 P_{mech} 、附加损耗 P_f 以及定转子铁损耗 P_{Fes} 、 P_{Fer} 近似不变,或者其变化在总的功率平衡中影响很小。因此若不考虑短路时的暂态过程,短路前后, $P_2 + P_{cus} + P_{cur} = P_1 - P_{mech} - P_f - P_{Fes} - P_{Fer}$ 近似不变。这可以作为分析时的已知功率条件。

定转子各电磁量的正方向规定与文献[12]相同,即规定定子正值电流产生负值磁链,其电压电流关系符合发电机原则;转子正值电流产生正值磁链,其电压电流关系符合电动机原则。

三、分析方法和基本方程

1. 考虑电网电源的影响

负载时,同步发电机的运行分析必须考虑励磁电源和电网电源之间的关系及其表达方式。对于无穷大电网,三相电压对称,一般表达式可以写成

$$\begin{cases} u_{AB} = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \theta_0), \\ u_{BC} = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \theta_0 - 120^\circ), \\ u_{CA} = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \theta_0 + 120^\circ). \end{cases} \quad (1)$$

在本文中,我们将对所有的定子线圈、转子磁极和阻尼回路按转向编号,并规定在 $\omega t = 0$ 时刻,转子第一磁极中心线恰与定子第 z_1 号线圈 (z_1 为定子槽数)轴线重合。因此两组电源的相互关系可以用 (1) 式中的 θ_0 表示。绕组正常时, θ_0 可以用功角、三相功率因数角、变压器相角移和机组参数等表示;而在绕组不对称时,功角等概念已经不适用。本文将把 θ_0 角当作未知量,并辅以功率方程来考虑电网电源的影响。

2. 电机的电压方程和磁链方程

我们将应用多回路法建立同步电机的数学模型。多回路法的要点是,电机被看作具有相对运动的电路网络,定子方面按各绕组支路(内部短路时,短路点把原支路分成两个支路)、转子方面按实际回路列写电压和磁链方程;计算定子支路参数时,则以单个线圈为基础,首先得到单个线圈的参数,然后根据支路的实际组成情况,用有关线圈的参数组成支路的参数;对于阻尼绕组,按其实际的笼形电路计算参数。由这些参数组成绕组对称或不对称时的变系数微分方程组,根据不同的运行状况求解方程。

根据本文规定的正方向,定子某一支路 Q 、励磁回路 fd 、转子第 g 极第 i 阻尼回路 gi 的电压和磁链方程分别为

$$\begin{cases} u_Q = P\psi_Q - r_Q i_Q, \\ \psi_Q = - \sum_{s=1}^{N_l} M_{s,Q} i_s + \sum_{i=1}^a \sum_{g=1}^{2P} M_{gi,Q} i_{gi} + M_{fd,Q} i_{fd}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u_{fd} = P\psi_{fd} + r'_{fd} i_{fd}, \\ \psi_{fd} = - \sum_{s=1}^{N_l} M_{s,fd} i_s + \sum_{i=1}^a \sum_{g=1}^{2P} M_{gi,fd} i_{gi} + L_{fd} i_{fd}; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} 0 = P\psi_{gi} + (2r_c + 2r_{ei}) i_{gi} - (i_{g,t-1} + i_{g,t+1}) r_c, \\ \psi_{gi} = - \sum_{s=1}^{N_l} M_{s,gi} i_s + \sum_{i'=1}^d \sum_{g'=1}^{2P} M_{g'i',gi} i_{g'i'} + L'_{fd,gi} i'_{fd}, \end{cases} \quad (4)$$

其中 N_l 为定子支路总数(包括短路时增加的支路), $2P$ 为极数, d 为每极阻尼条数。

励磁回路电压 u_{fd} 一般认为是已知直流量,因为直流励磁电流和励磁绕组电阻假定已知。定子支路电压 u_Q 可以根据绕组的连接情况用三相电压 u_A, u_B, u_C 表示(对于没有发生内部短路的支路)或者根据短路情况具体写出。例如,匝间短路时(参见图 2),

$$\begin{cases} u_{ai} = u_A - u_k, \\ u_k = (i_k - i_{ai}) r_{sd}. \end{cases} \quad (5)$$

支路之间短路时(参见图 3),

$$\begin{cases} u_{ai} = u_A - u_{N+1}, \\ u_{bi} = u_B - u_{N+2}, \\ u_{N+1} - u_{N+2} = (i_{ai} - i_{N+1}) r_{gd}. \end{cases} \quad (6)$$

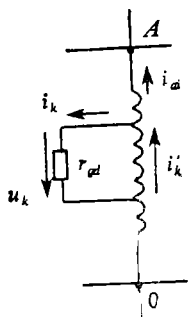


图2 匝间短路
(r_{gd} 为过渡电阻)

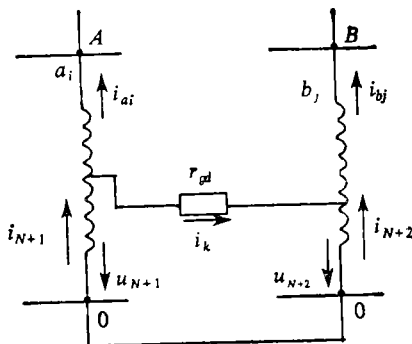


图3 支路之间短路

3. 外部连接方程(参见图1)

$$\begin{cases} i_{a1} + i_{a2} + \cdots + i_{an} = i_A, \\ i_{b1} + i_{b2} + \cdots + i_{bn} = i_B, \\ i_{c1} + i_{c2} + \cdots + i_{cn} = i_C, \end{cases} \quad (7)$$

$$i_A + i_B + i_C = 0, \quad (8)$$

$$\begin{cases} u_A - u_B = u_{AB}^F, \\ u_B - u_C = u_{BC}^F. \end{cases} \quad (9)$$

4. 变压器方程

$$\begin{cases} u_{AB}^F - \left(L_T \frac{di_A}{dt} + r_T i_A \right) + \left(L_T \frac{di_B}{dt} + r_T i_B \right) = \frac{1}{3K} (u_{Aa}^{\infty} - u_{Ca}^{\infty}), \\ u_{BC}^F - \left(L_T \frac{di_B}{dt} + r_T i_B \right) + \left(L_T \frac{di_C}{dt} + r_T i_C \right) = \frac{1}{3K} (u_{BC}^{\infty} - u_{AB}^{\infty}). \end{cases} \quad (10)$$

5. 功率方程

在没有零序回路时,机端的电功率表达式为

$$\begin{cases} W = u_{AB}^F i_A - u_{BC}^F i_C, \\ Q = \frac{1}{\sqrt{3}} (u_{AB}^F i_C + u_{BC}^F i_A + u_{CA}^F i_B). \end{cases} \quad (11)$$

四、基本方程的求解方法

(2)~(4)式、(5)式或(6)式、(7)~(11)式组成负载时同步电机定子绕组内部短路分析时的基本方程组。由于定子绕组自感系数和定转子间互感系数是随转子位置变化的,并且(1)式中的 θ_0 作为未知量,增加了有功功率方程,所以组成的方程组是非线性变系数微分方程组。直接求解相当复杂。为此,必须寻找简化算法。

本文将采用以下两个步骤简化方程组的求解。第一,在稳态情况下,将变系数微分方程组转换成等效的常系数代数方程组;第二,根据方程组的特点,进一步简化非线性方程组的求解。

了解绕组故障时的稳态情况,对于预测故障的后果、设计和分析保护方案以及进一步分

析故障时的瞬态过程都有重要意义。分析稳态运行时, 可以先分析定转子回路电流中可能出现的谐波次数, 写出电压和电流的表达式, 并将表达式代入微分方程组, 然后利用同频率量相等的原则, 把微分方程组转换为非线性常系数代数方程组。代数方程组的未知数总数为

$$N_1 = (H_i + 1) \cdot N_i + (H_r - 1) + H_r \cdot 2P \cdot d + N_T, \quad (12)$$

其中 H_i 为欲计算的定子电流最高谐波次数, H_r 为欲计算的阻尼电流最高谐波次数, N_T 为反映电机与系统联接时附加的未知量个数, $N_T \leq (H_i + 1) \cdot 10$ 。有关这部分的公式推导参见文献[7]。

非线性方程组的求解一般归结为求解同阶的线性方程组。用通常的方法求解, 计算量一般都比较大大。仔细观察方程组可以发现, 如果(1)式中的 θ_0 已知, 则方程组中可以减少一个方程(如功率方程), 并使之变成线性方程组。因此求解时, 我们只需对 θ_0 进行迭代, 而以功率条件作为迭代收敛的判据。实际计算时, 可以在 θ_0 符合物理意义的范围内, 选取一系列数值, 并由此计算出方程组的多列右端项, 只通过一次解方程的消去过程, 得到对应于不同 θ_0 值的一系列稳态电流分布, 进一步计算出功率、损耗等量, 其中符合功率条件的一组解就是所求的运行状态。

五、计算实例

我们把上述分析方法应用于 30 kVA 模拟发电机(北京电力设备总厂制造), 并将计算结果与试验结果进行比较。

额定电压时绕组内部短路电流数值很大(可达到正常时额定电流的 20 倍), 给试验机组带来严重威胁, 也给试验工作带来极大不便。由于短路时间不宜过长, 短路时刻和短路切除时刻均由相角合闸器控制, 各有关物理量均由光线示波器拍摄, 可能时适当辅以表计。

计算时, 参数采用磁场数值分析法所得的结果。绕组正常时, 负载运行的计算与试验结果的比较见表 1。可以看出两者吻合较好。

我们比较了同步电机定子绕组的三种内部短路, 即匝间短路 ($A_1 40\%$ 对 2%)、同相不同分支间短路 ($A_1 20\%$ 对 $A_2 10\%$) 和相间短路 ($A_1 20\%$ 对 $B_1 10\%$)。表 2 列出了比较结果。

表 1 绕组正常时稳态负载运行计算和试验结果

	$I_{fd}(A)$	$U(V)$	$I(A)$	$W(kW)$	$Q(kvar)$
试验值	4.25	400.0	26.0	17.15	7.90
计算值	4.25	398.5	27.4	17.05	8.10
误差		-0.4%	5.4%	-0.6%	2.5%

通过比较可以看出计算结果和试验结果的差别如下: 机端电压偏差小于 3%; 线电流偏差基本上在 10% 的范围内; 支路电流的偏差大部分小于 15%, 但也有个别数值偏差较大; 短路回路电流的偏差小于 15%; 保护方案中常用的故障特征量(励磁电流二次谐波分量 I_{fd2} , 中性点连线电流 I_{0-0} , 零序电压 $3U_0$ 等)的偏差大部分小于 10%; 负序电压 U_2 、电流 I_2 和功率 P_2 没有试验值, 无法进行比较, 但计算和试验的负序功率方向是相同的。比较结果表明,

计算结果和试验结果基本吻合,说明本文提出的方法是有效和合理的。

表 2 内部短路计算结果和试验结果比较*

	$A_1 40\%$ 对 2% 短路			$A_1 20\%$ 对 $A_2 10\%$ 短路			$A_1 20\%$ 对 $B_1 10\%$ 短路		
	试验值	计算值	误差	试验值	计算值	误差	试验值	计算值	误差
$I_{fd}(A)$	4.25	4.25		4.28	4.28		4.33	4.33	
$U_{AB}(V)$	×	326.8		395.0	392.0	-0.8%	355.0	349.6	-1.5%
$U_{BC}(V)$	×	377.8		399.5	397.5	-0.5%	390.0	383.1	-1.8%
$I_A(A)$	49.6	46.4	-6.5%	25.4	25.1	-1.2%	23.1	22.2	-3.9%
$I_B(A)$	50.5	49.8	-1.4%	27.5	28.8	4.7%	40.0	41.2	3.0%
$I_C(A)$	10.7	12.7	18.7%	23.1	25.3	9.5%	24.2	26.8	10.7%
$W(kW)$	14.45	14.91	3.2%	16.97	16.99	0.1%	17.15	17.32	1.0%
$Q(kvar)$	-13.63	-15.10	10.8%	6.58	5.88	-10.6%	×	-5.77	
$I_{A1}(A)$	75.8	67.3	-11.2%	17.4	15.1	-13.2%	21.7	18.3	-15.7%
$I_{A2}(A)$	30.6	30.5	-0.3%	21.9	21.3	-2.7%	15.1	16.8	11.3%
$I_{B1}(A)$	52.6	47.2	-10.3%	17.7	17.8	0.6%	36.0	37.2	3.3%
$I_{B2}(A)$	9.0	6.6	-26.7%	11.3	14.7	30.1%	13.0	12.7	-2.3%
$I_{C1}(A)$	34.0	26.2	-22.9%	2.0	4.3		6.5	5.9	-9.2%
$I_{C2}(A)$	36.7	33.5	-8.7%	22.5	23.8	5.8%	26.0	27.8	6.9%
$I_{fd1}(A)$	0.360	0.338	-6.1%	(很小)	0.035		0.139	0.150	7.9%
$I_{0-0}(A)$	8.0	6.4	-20.0%	120.0	132.8	10.7%	18.4	19.8	7.6%
$3U_0(V)$	×	40.0		5.1	5.1	0%	8.7	8.8	1.1%
$U_2(V)$	×	32.5		×	3.7		×	19.9	
$I_2(A)$	×	21.5		×	2.4		×	13.1	
$P_2(W)$	×	+276.6		×	+3.51		×	+103.5	
$I_f(A)$	343.0	327.2	-4.6%	101.7	106.3	4.5%	218.0	236.9	8.7%

* 号表示没有实验值。

引起计算和试验结果偏差的原因很多。主要的有定子铁心局部饱和变化,叠片磁极阻尼作用,试验过程中的接触电阻和连线电阻,电网电压波动等。

六、结 论

1. 联网带载时同步电机定子绕组内部短路,国内外仍尚少研究。本文采用多回路法,建立同步电机绕组不对称时的数学模型,能够考虑多种谐波(包括分数次谐波)的作用,比以往的分析方法有明显的优越性。在考虑电网电源影响时,提出以电压相角为变量,并辅以功率方程,有效地解决了负载时出现的关键问题,并能大大地简化计算工作。

2. 应用本文提出的方法,可以计算得到定子各分支电流,各相电流,中性点连线电流,转子二次谐波电流,零序电压,负序电压、电流和功率等,且计算精度能满足工程要求,为各种内部短路保护方案分析提供了充分的根据。

3. 多回路理论在计算参数时,定子绕组从单个线圈出发。因此,可以分析不同的绕组情况,如 60° 相带绕组和 120° 相带绕组,整数槽和分数槽绕组,波绕组和叠绕组,变极调速绕组等,具有广泛的适用性。

参 考 文 献

- [1] Horn, F. J. & Johrde. P. S., *IEEE Trans. PAS*, **94** (1975), 6: 2015.
- [2] Кирейцев, В. В. и др., *Электротехника*, **5** (1979), 26.
- [3] Kinisty, V. A., *IEEE Trans. PAS* **87**(1968), 8: 1675.
- [4] 何仰赞, 华中工学院学报, 1979, 1: 140.
- [5] Nyamusa, T. A. et al., *IEEE Trans. EC*, **2** (1978), 1: 86.
- [6] 高景德、王祥珩, 清华大学学报(自然科学版), **27** (1987), 1: 1.
- [7] 王祥珩, 中国电机工程学报, **7** (1987), 5: 1.
- [8] Wang Xiangheng et al., *Fourth International Conference on Developments in Power System Protection*, Edinburg, UK, April. 11--13 1989, 202.
- [9] 邱阿瑞、张龙照, 电工技术学报, 1987, 3: 7.
- [10] Sun Weining et al., *Proceedings of BICEM*, Beijing, PRC, August. 1987 333.
- [11] Kulig, T. S. et al., *IEEE Winter Meeting*, New Orleans, USA 1986.
- [12] 高景德、张麟征, 电机过渡过程的基本理论及分析方法, 科学出版社, 1983, 261.