

双绕组交直流发电机直流侧突然短路分析

孙俊忠¹, 马伟明², 宋振海³

(1. 清华大学, 北京市 海淀区 100084; 2. 海军工程大学, 湖北省 武汉市 430033;
3. 海军潜艇学院, 山东省 青岛市 266071)

ANALYSIS OF SUDDEN DC-SIDE SHORT CIRCUIT OF DOUBLE-WINDING AC-DC GENERATORS

SUN Jun-zhong¹, MA Wei-ming², SONG Zhen-hai³

(1. Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China; 2. Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei Province, China; 3. Naval Submarine Academy, Qingdao 266071, Shandong Province, China)

ABSTRACT: According to the basic flux-linkage equations, voltage equations and equivalent circuits of 3- & 12-phase double-winding AC-DC generators, the basic voltage equations are presented for the sudden DC-side short circuit of 3- & 12-phase double-winding AC-DC generators with the 3-phase AC-winding loaded. With some appropriate approximations, the transient process of the sudden DC-side short circuit is analyzed by making an analytical approach, and the concise time constant expressions of the stator and rotor windings and complete expressions of the AC-side short-circuit currents of the 12-phase DC winding as well as the approximate expression of DC-side maximum short-circuit current are derived. Furthermore, the effect of AC-side load on the sudden DC-side short-circuit current is analyzed, and its physical interpretation is also presented. The results show that the value of AC-side load current has considerable effect on the DC-side short-circuit current, but the power factor has little effect. The calculated and measured results agree quite well, showing the validity of the analytical analysis developed.

KEY WORDS: Electric machinery and electrotechnology; Double-winding AC-DC generator; Sudden DC-side short circuit; Short-circuit current; Time constant

摘要: 根据3/12相双绕组发电机的基本磁链方程和电压方程以及等效电路, 该文建立了双绕组发电机交流侧带负载时直流侧突然短路的基本电压方程; 通过进行适当的近似, 用解析的方法分析了突然短路的过渡过程, 给出了定转子时间常数的简明表达式和整流绕组交流侧的短路电流表达式以及

直流侧最大短路电流的近似计算公式。在此基础上, 研究了交流负载对直流侧短路电流的影响并给出了相应的物理解释。模拟试验结果表明: 交流侧负载的大小对直流侧短路电流有较大的影响, 而功率因数对直流侧短路电流的影响很小, 验证了理论分析的准确性。

关键词: 电机电工; 双绕组发电机; 直流侧突然短路; 短路电流; 时间常数

1 引言

3/12相双绕组交直流发电机系统(简称双绕组发电机)是一种新型的独立供电系统, 该系统具有成本低、体积小、重量轻和交流电压波形畸变小点的显著优点, 特别适用于同时需要交流和直流电源的独立系统, 如舰船、飞机、移动通讯站、石油钻井平台等^[1-9]。目前, 对该系统已经进行了许多的理论研究, 例如, 数学模型和参数^[1,6-8]、交直流同时突然短路^[3]以及运行稳定性^[6,10]等, 但对于双绕组发电机交流侧带负载时直流侧突然短路的分析还没有进行。交流侧带负载时直流侧突然短路是双绕组发电机系统最常见的短路故障之一, 由于两套绕组之间的相互耦合, 电磁关系变得相当复杂, 使得突然短路后的过渡过程的解析分析比较困难。本文在文献[1]建立的数学模型基础上, 借鉴文献[2-3,11-15]的有关研究方法, 对双绕组发电机交流侧带负载时直流侧突然短路的过渡过程进行了详细的解析分析, 得出了突然短路后整流绕组交流侧短路电流的简明解析表达式和直流侧短路电流最大值的近似估算公式以及有关时间常数的简明表达式, 深入研究了交

基金项目: 国家自然科学基金项目(59777007)。

Project Supported National Natural Science Foundation of China (59777007).

流负载对直流侧短路电流的影响,并通过试验检验了理论分析的准确性。本文的研究结果可对该类电机及其保护装置的优化设计提供重要的理论参考。

为分析方便,假定短路前交流侧运行在额定功率因数负载附近(功率因数较低的情况本文后面有说明),直流侧为空载,短路发生在直流侧出线端,不考虑线路阻抗的影响,并认为短路前后转速和励磁均保持不变。

2 短路前稳态运行方程

设交流侧为三相对称线性负载, R 、 X 分别表示其每相电阻和电抗,直流侧空载,根据文献[1]的基本方程,可推得交流绕组稳态电流

$$\begin{cases} i_{dA0} = x_{qAL} E_A / (x_{dAL} x_{qAL} + r_{AL}^2) \\ i_{qA0} = r_{AL} E_A / (x_{dAL} x_{qAL} + r_{AL}^2) \end{cases} \quad (1)$$

$$i_{A0} = i_{dA0} \cos(\theta - \alpha) - i_{qA0} \sin(\theta - \alpha) \quad (2)$$

其中, α 表示交流A相绕组与整流绕组 a_1 相绕组轴线的夹角^[1];下标“0”表示短路前稳态的各量; E_A 表示交流绕组励磁电势; i_{dA} 、 i_{qA} 、 i_A 分别表示交流绕组 d 、 q 轴和A相电流; x_{dA} 、 x_{qA} 分别表示 d 、 q 轴同步电抗; r_A 表示交流绕组相电阻; $x_{dAL} = x_{dA} + X$ 、 $x_{qAL} = x_{qA} + X$ 、 $r_{AL} = R + r_A$ 。

将 θ 分别换为 $(\theta - 120^\circ)$ 、 $(\theta + 120^\circ)$ 可得B、C相电流。

由文献[1]的电压和磁链方程,还可推得稳态时整流绕组电压

$$\begin{cases} u_{da0} = x_{qM} i_{qA0} = U_a \sin \delta_a \\ u_{qa0} = E_A - x_{dM} i_{dA0} = U_a \cos \delta_a \end{cases} \quad (3)$$

式中下标 a 为整流绕组的量; δ_a 为整流绕组电压 U_a 与 E_A 夹角; $x_{dM} = x_{dA} - \Delta x_{lA1}$ 、 $x_{qM} = x_{qA} - \Delta x_{lA1}$ 、 Δx_{lA1} 为交流绕组净漏抗^[1,13]。

3 直流侧短路后的基本方程

根据文献[2]:直流侧短路相当于交流侧对称短路(就交流侧而言)。应用叠加原理,直流侧短路相当于整流绕组交流侧突然施加一反向电压,由此引起的短路电流称为短路电流的变化部分,该部分与原来的稳态电流之和,即为短路后的总电流。

应用文献[1]的电压和磁链的基本方程式,可得短路后的基本方程:

$$\begin{bmatrix} p x_{da}(p) + r_a & p x_{dM}(p) & -x_{qa}(p) & -x_{qM}(p) \\ x_{da}(p) & x_{dM}(p) & p x_{qa}(p) + r_a & p x_{qM}(p) \\ p x_{dM}(p) & p x_{dAL}(p) + r_{AL} & -x_{qM}(p) & -x_{qAL}(p) \\ x_{dM}(p) & x_{dAL}(p) & p x_{qM}(p) & p x_{qAL}(p) + r_{AL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{da1} \\ i_{dA1} \\ i_{qa1} \\ i_{qA1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_a \sin \delta_a \mathbf{1} \\ U_a \cos \delta_a \mathbf{1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,下标1表示突加反电压后的变化量; $\mathbf{1}$ 代表单位阶跃函数;

$$x_{da}(p) = x_{dM}(p) + \Delta x_{lA1}; \quad x_{dA}(p) = x_{dM}(p) + \Delta x_{lA1};$$

$$x_{dAL}(p) = x_{dA}(p) + X; \quad x_{qa}(p) = x_{qM}(p) + \Delta x_{lA1};$$

$$x_{qA}(p) = x_{qM}(p) + \Delta x_{lA1}; \quad x_{qAL}(p) = x_{qA}(p) + X;$$

$$r_{AL} = r_A + R。$$

4 定转子短路时间常数

根据短路后的基本方程(4),可得到相应的特征方程。为了简明地得到定转子的时间常数,忽略有关的小量,参考三相电机的处理方法,从物理概念上进行近似求解^[12-15],即:求定子的时间常数时可以忽略转子各回路的电阻;求转子的时间常数时可以忽略定子各回路的电阻。可得定子的短路时间常数为

$$\begin{cases} T_{aL1} = \frac{2x_{daL1}'' x_{qaL1}''}{R_{AaL}(x_{daL1}'' + x_{qaL1}'')} \\ T_{aL2} = \frac{S_L}{r_a + r_{AL}} = \frac{S_L}{R_y} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{其中} \begin{cases} x_{lAL} = x_{lA} + X \\ \Delta x_{lAL} = x_{lAL} - x_{lmAa} \\ \Delta x_{lA1} = x_{lA} - x_{lmAa} \end{cases} \quad (6a)$$

$$\begin{cases} S_L = \Delta x_{lA1} + \Delta x_{lAL1} \\ \Delta x_{aL} = \Delta x_{lA1}^2 / S_L \\ \Delta x_{AL} = \Delta x_{lAL1}^2 / S_L \end{cases} \quad (6b)$$

$$\begin{cases} R_{AaL} = (\Delta x_{aL} r_{AL} + \Delta x_{AL} r_a) / S_L \\ R_y = r_a + r_{AL} = r_a + r_A + R \end{cases} \quad (6c)$$

$$x_{daL1}(p) = x_{da}(p) - \Delta x_{aL} = x_{dAL}(p) - \Delta x_{AL} \quad (6d)$$

$$x_{qaL1}(p) = x_{qa}(p) - \Delta x_{aL} = x_{qAL}(p) - \Delta x_{AL} \quad (6e)$$

$$x_{daL1}'' = x_{da}'' - \Delta x_{aL} = x_{dAL}'' - \Delta x_{AL} \quad (6f)$$

$$x_{qaL1}'' = x_{qa}'' - \Delta x_{aL} = x_{qAL}'' - \Delta x_{AL} \quad (6g)$$

$$x_{daL1}' = x_{da}' - \Delta x_{aL} = x_{dAL}' - \Delta x_{AL} \quad (6h)$$

$$x_{qaL1}' = x_{qa}' - \Delta x_{aL} = x_{qAL}' - \Delta x_{AL} \quad (6i)$$

这两个时间常数相差较大，其中一个 T_{daL1} 比另一个 T_{al2} 大的多，前者是由短路后 d 、 q 轴超瞬变电抗的调和平均值 $1/[(1/x_{daL1}'' + 1/x_{qaL1}'')/2]$ 与相应的定子等效电阻 R_{AaL} 决定，数值较大；后者由定子两绕组电阻之和 ($r_a + r_{AL}$) 与净漏电抗^[1,13]之和 ($\Delta x_{la1} + \Delta x_{lAL1}$) 决定，数值较小。可以预见：短路后的定子绕组中，将有两部分直流分量和二次谐波分量，它们分别按差距较大的两个时间常数衰减；其中时间常数小的一部分衰减非常快，另一部分的衰减相对要慢一些。在这种考虑下，在求最大短路电流时，如果衰减很快的那一部分的数值较小，对最大短路电流的贡献很小，便可予以忽略，只需考虑衰减相对较慢的那一部分。

转子的短路时间常数：

$$\begin{cases} T_d' = x_{daL1}' T_{do}' / x_{daL1} \\ T_d'' = x_{daL1}'' T_{do}'' / x_{daL1}' \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} T_q' = x_{qaL1}' T_{qo}' / x_{daL1} \\ T_q'' = x_{qaL1}'' T_{qo}'' / x_{daL1}' \end{cases} \quad (8)$$

T_{do}' 、 T_{do}'' 、 T_{qo}' 、 T_{qo}'' 为定子开路时转子的时间常数，与三相电机相同。

5 短路电流

5.1 短路电流变化量的运算表达式

解方程式(4)，可得到 d 、 q 轴短路电流变化量的运算表达式。

通常，当负载功率因数在额定功率因数附近时， $r_{AL} \gg r_a$ 、 $X \gg \Delta x_{la1}$ ，忽略相应的 $\Delta x_{al}/S_L$ 、 r_a 各项，可得

$$i_{da1} = \frac{U_a (p \sin \delta_a + \cos \delta_a)}{x_{daL1}(p) \left[p^2 + p \left(\frac{1}{x_{daL1}(p)} + \frac{1}{x_{qaL1}(p)} \right) R_{AaL} + 1 \right]} \mathbf{1} + \frac{U_a [(S_L p + R_y) \sin \delta_a + S_L \cos \delta_a]}{(S_L p + R_y)^2 + S_L^2} \mathbf{1} \quad (9)$$

$$i_{qa1} = \frac{U_a (p \cos \delta_a - \sin \delta_a)}{x_{qaL1}(p) \left[p^2 + p \left(\frac{1}{x_{daL1}(p)} + \frac{1}{x_{qaL1}(p)} \right) R_{AaL} + 1 \right]} \mathbf{1} + \frac{U_a [(S_L p + R_y) \cos \delta_a - S_L \sin \delta_a]}{(S_L p + R_y)^2 + S_L^2} \mathbf{1} \quad (10)$$

$$i_{da1} = - \frac{U_a \frac{\Delta x_{mL}}{S_L} (p \sin \delta_a + \cos \delta_a)}{x_{daL1}(p) \left[p^2 + p \left(\frac{1}{x_{daL1}(p)} + \frac{1}{x_{qaL1}(p)} \right) R_{AaL} + 1 \right]} \mathbf{1} - \frac{U_a [(S_L p + R_y) \sin \delta_a + S_L \cos \delta_a]}{(S_L p + R_y)^2 + S_L^2} \mathbf{1} \quad (11)$$

$$i_{qa1} = - \frac{U_a \frac{\Delta x_{mL}}{S_L} (p \cos \delta_a - \sin \delta_a)}{x_{qaL1}(p) \left[p^2 + p \left(\frac{1}{x_{daL1}(p)} + \frac{1}{x_{qaL1}(p)} \right) R_{AaL} + 1 \right]} \mathbf{1} - \frac{U_a [(S_L p + R_y) \cos \delta_a - S_L \sin \delta_a]}{(S_L p + R_y)^2 + S_L^2} \mathbf{1} \quad (12)$$

其中， $\Delta x_{mL} = \Delta x_{la1} \Delta x_{lAL1} / S_L$ ，其它符号的意义见式(6)。

5.2 d 、 q 轴短路电流变化量的展开式

展开式(9)~(12)，可得

$$i_{da1} = \frac{U_a \cos \delta_a}{x_{daL1}(p)} \mathbf{1} - \frac{U_a e^{-\frac{t}{T_{daL1}}}}{x_{daL1}''} \cos(t + \delta_a) \mathbf{1} + \frac{U_a}{\sqrt{R_y^2 + S_L^2}} \left[\cos(\delta_a - \gamma) - e^{-\frac{t}{T_{al2}}} \cos(t + \delta_a - \gamma) \right] \mathbf{1} \quad (13)$$

$$i_{da1} = - \frac{U_a \frac{\Delta x_{mL}}{S_L} \cos \delta_a}{x_{daL1}(p)} \mathbf{1} + \frac{\Delta x_{mL} U_a e^{-\frac{t}{T_{daL1}}}}{S_L x_{daL1}''} \cos(t + \delta_a) \mathbf{1} - \frac{U_a}{\sqrt{R_y^2 + S_L^2}} \left[\cos(\delta_a - \gamma) - e^{-\frac{t}{T_{al2}}} \cos(t + \delta_a - \gamma) \right] \mathbf{1} \quad (14)$$

$$i_{qa1} = - \frac{U_a \sin \delta_a}{x_{qaL1}(p)} \mathbf{1} + \frac{U_a e^{-\frac{t}{T_{qaL1}}}}{x_{qaL1}''} \sin(t + \delta_a) \mathbf{1} - \frac{U_a}{\sqrt{R_y^2 + S_L^2}} \left[\sin(\delta_a - \gamma) - e^{-\frac{t}{T_{al2}}} \sin(t + \delta_a - \gamma) \right] \mathbf{1} \quad (15)$$

$$i_{qa1} = - \frac{\Delta x_{mL} U_a \sin \delta_a}{S_L x_{qaL1}(p)} \mathbf{1} - \frac{\Delta x_{mL} U_a e^{-\frac{t}{T_{qaL1}}}}{S x_{qaL1}''} \sin(t + \delta_a) \mathbf{1} + \frac{U_a}{\sqrt{R_y^2 + S_L^2}} \left[\sin(\delta_a - \gamma) - e^{-\frac{t}{T_{al2}}} \sin(t + \delta_a - \gamma) \right] \mathbf{1} \quad (16)$$

其中， $\gamma = \arctan R_y / S_L$ 。

因为 $R_y = R + r_a + r_a$ ， $S_L = \Delta x_{la1} + \Delta x_{lAL1}$ ， $x_{lAL} = x_{lA} + X$ ， $\Delta x_{lAL1} = x_{lAL} - x_{lmAa}$ ，通常，在额定

功率因数附近时, $R_y \approx R, S_L \approx X$, 所以, $\gamma \approx \arctan R/X$, γ 主要是由负载性质决定的。

5.3 整流绕组交流侧 a-b-c 坐标系短路电流

因为短路前直流侧空载, 所以整流绕组交流侧短路电流的变化量即为短路后的总电流。

由式(13)、(15), 可得 a-b-c 坐标系整流绕组交流侧短路电流, 以 a_1 相电流为例,

$$i_{a1} = k[i_{da} \cos \theta - i_{qa} \sin \theta] / 4 =$$

$$\frac{kU_a}{4} \left\{ \cos \delta_a \cos \theta \left[\left(\frac{1}{x''_{daL1}} - \frac{1}{x'_{daL1}} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{x'_{daL1}} - \frac{1}{x_{daL1}} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \frac{1}{x_{daL1}} \right] + \sin \delta_a \sin \theta \left[\left(\frac{1}{x''_{qaL1}} - \frac{1}{x'_{qaL1}} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{x'_{qaL1}} - \frac{1}{x_{qaL1}} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \frac{1}{x_{qaL1}} \right] - \frac{\cos(\theta_0 - \delta_a)}{2} \left(\frac{1}{x''_{daL1}} + \frac{1}{x''_{qaL1}} \right) e^{-\frac{t}{T_{aL1}}} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_{daL1}} - \frac{1}{x''_{qaL1}} \right) \cos(2t + \theta_0 + \delta_a) e^{-\frac{t}{T_{aL1}}} + \frac{\cos(\theta - \delta_a + \gamma)}{\sqrt{R_y^2 + S_L^2}} - \frac{\cos(\theta_0 - \delta_a + \gamma)}{\sqrt{R_y^2 + S_L^2}} e^{-\frac{t}{T_{aL2}}} \right\} \quad (17)$$

用 $\theta - 120^\circ$ 、 $\theta + 120^\circ$ 置换上式中的 θ , 可得 b_1 、 c_1 相电流表达式。全部整流绕组各相电流表达式为

$$i_{aj} = \frac{k}{4} [i_{da} \cos(\theta - (j-1)15^\circ) - i_{qa} \sin(\theta - (j-1)15^\circ)], (j=1, 2, 3, 4) \quad (18)$$

用 $\theta - 120^\circ$ 、 $\theta + 120^\circ$ 置换式(18)中的 θ , 可得 b_j 、 c_j 相电流表达式。

说明: 上面各式中的系数 $k/4$ 是由文献[1]的等效和折算关系得到的, 相当于将等效并折算到交流绕组的电流还原为整流绕组各绕组 Y 的电流, k 表示交流绕组与整流绕组单 Y 有效匝数比^[1]。

5.4 直流侧最大短路电流

根据上面得出的整流绕组交流侧短路电流的表达式(17), 应用文献[2]的结论(十二相整流直流侧短路电流最大值等于其交流侧短路电流最大值的 3.831 倍), 可得直流侧最大短路电流为

$$i_{dc \max} = 3.831 i_{a1 \max} \quad (19)$$

$i_{a1 \max}$ 为由式(18)所得整流绕组交流侧短路电流最大值。

5.5 试验验证

模拟样机(参数见附录)在交流侧带不同负载、直流侧空载下突然短路, 直流侧短路电流的试验和计算结果如表 1 所示; 交流侧带负载($U_{AB}=100V$, $I_A=10A$, $\cos \phi=0.8$)、直流侧空载下突然短路的实测短路电流波形如图 1 所示。

表 1 计算和实测的最大直流侧短路电流

Tab.1 Maximum DC-side short-circuit currents of calculation and test

U_{AB}/V	I_A/A	$\cos \phi$	直流最大短路电流/A		误差/%
			试验值	计算值	
100	10	0.8	228.9	246.4	7.6
100	8.15	0.8	221.0	238.2	7.8
75.3	5.7	0.7	161.0	174.8	8.6

由表 1 可见, 理论计算的结果与试验测试的结果误差较小, 这表明前面的理论分析是正确的。由图 1 可见, 直流侧的短路电流可达很大的数值。

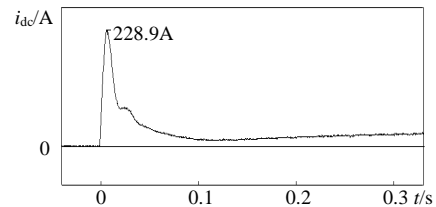


图 1 直流侧短路电流波形

Fig. 1 Waveform of DC-side short-circuit current

6 交流负载对短路电流的影响

6.1 交流负载大小对短路电流的影响

下面通过数值计算和试验两种方法说明交流负载的大小对短路电流的影响, 并给出物理解释。

模拟样机在 $U_{AB}=100V$, $\cos \phi=0.8$ 不同交流负载电流时, 由式(19)计算出的直流侧短路电流最大值及试验结果如表 2 所示。

表 2 不同交流负载大小时直流侧最大短路电流

Tab. 2 Maximum DC-side short-circuit currents under various AC load values

交流负载电流 I_A/A	0	2.35	5.85	8.15	10
$i_{ac \max}$ 计算/A	213.5	217.4	228.1	238.2	246.4
$i_{ac \max}$ 试验/A	196.2	206.9	215.0	221.5	228.9

由表 2 可见, 在同一交流电压和一定功率因数下, 随着交流负载的增大, 直流侧短路电流最大值明显增大。物理解释如下:

根据文献[1]的基本方程和本文第一部分的稳态分析, 可画出相应的相量图, 如图 2。由图 2 可见, 若交流负载电流增大, 则电枢反应增加, 绕组漏阻抗的压降也增加, 为保持交流电压不变, 必须增加励磁电流以抵消增加的电枢反应和补偿增加的绕组

漏阻抗压降（电枢磁势和绕组漏阻抗压降都与负载电流成正比），从而使气隙磁场及其在整流绕组感应的气隙电势增大，这一因素是使整流绕组电压增大；另一方面，交流绕组与整流绕组之间还存在漏磁场耦合作用，交流绕组电流在整流绕组中产生互漏抗压降，这个因素是使整流绕组电压减小。

上述两种作用因素可通过下式进一步说明。由相量图图 2 可得

$$U_a = U_A + (r_A + j\Delta x_{lA1})I_A = U_A + [r_A + j(x_{lA} - x_{lmAa})]I_A = E_{\delta A} - jx_{lmAa}I_A = kE_{\delta y} - jkx_{lmAy}I_A \quad (20)$$

其中， $E_{\delta A}$ 、 $E_{\delta y}$ 分别为交流绕组和整流绕组气隙电势。

式(20)体现了上述两种因素的作用，通常 $x_{lA} > x_{lmAa}$ ，即第一因素起主要作用，因此交流绕组电流增加使整流绕组电压增大，从而使短路电流增大。所以在同一交流电压和一定功率因数下，随着交流负载的增大，直流侧短路电流最大值也增大。

6.2 交流负载功率因数对短路电流的影响

模拟样机在 $U_{AB}=100V$ ， $I_A=10A$ 时，用式(19)计算带不同功率因数的交流负载时直流侧的短路电流最大值，计算结果和试验结果如表 3 所示。

表 3 不同交流负载功率因数时直流侧最大短路电流
Tab. 3 Maximum DC-side short-circuit currents under various AC load power coefficients

$\cos\phi$	i_{acmax} 计算/A	i_{acmax} 试验/A
0.6	247.1	230.0
0.7	246.8	228.6
0.8	246.4	228.9
0.9	245.8	224.0

由表 3 可见，在同一交流电压和负载电流的情况下，随着功率因数的变化，直流侧短路电流最大值变化不大，所以功率因数对直流侧短路电流的影响很小。物理解释如下：

功率因数改变后，电枢反应、绕组漏抗压降（如图 2）均会有所变化，为保持交流电压不变，必须相应地改变励磁电流，但由于负载电流保持不变，使得交流绕组磁势和漏抗压降的大小不变，仅是相角有所变化，这对整流绕组交流侧短路前电压影响不大，所以对短路电流影响不大。

值得说明的是：本文所得短路电流的计算公式，是在假定交流负载为额定功率因数附近的情况下得到的，若功率因数太低，则计算误差会稍有增大，但在工程上仍可近似认为是准确的。例如，纯电感负载， $U_{AB}=100V$ ， $I_A=10A$ ，短路电流最大值计

算结果约为 247A，与实测值 220A误差为 12.3%，稍大于 10%。

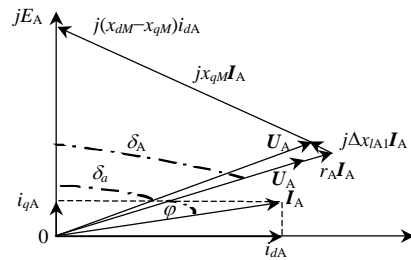


图 2 相量图
Fig. 2 Phasor diagram

7 结论

本文分析了双绕组发电机交流侧带负载直流侧突然短路的过渡过程，给出了直流侧突然短路后整流绕组交流侧短路电流的完整表达式和直流侧最大短路电流的近似计算公式，明确了交流负载对直流侧短路电流的影响：

(1) 在同一交流电压和一定功率因数下，交流负载的大小对直流侧短路电流有较大影响，随着交流负载的增大，直流侧短路电流最大值明显增大。

(2) 在同一交流电压和一定负载电流的情况下，功率因数对直流侧短路电流的影响较小，随着功率因数的变化，直流侧短路电流最大值变化不大。

参考文献

- [1] 孙俊忠, 马伟明, 吴旭升, 等. 3/12 相双绕组发电机数学模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003(1): 93-96, 131.
Sun Junzhong, Ma Weiming, Wu Xusheng et al. A study on mathematical model of 3-&12-phase synchronous generators with AC and bridge rectified DC output[J]. Proceedings of the CSEE, 2003(1): 93-96.
- [2] 马伟明, 胡安, 袁立军. 十二相同步发电机整流系统直流侧突然短路的研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 31-36.
Ma Weiming, Hu An, Yuan Lijun. Sudden DC-side short circuit of A 12-phase synchronous generator-rectifier system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 31-36.
- [3] 孙俊忠, 马伟明, 吴旭升, 等. 3/12 相双绕组发电机交直流同时突然短路研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 71-76.
Sun Junzhong, Ma Weiming, Wu Xusheng et al. Sudden simultaneous AC-&DC-side short circuits of 3-&12-phase synchronous generators with AC and bridge rectified DC output[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 71-76.
- [4] Paul W. Franklin. A theoretical study of the three phase salient pole type generator with simultaneous AC and bridge rectified DC output-Part I and Part II[J]. IEEE Trans. on PAS, 1973, 92(2): 543-557.
- [5] Schiferl R F, Ong C M. Six phase synchronous machine with AC and DC stator connections, Part I and Part II[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(8): 2685-2701.
- [6] 李义翔. 交直流混合供电双绕组发电机研究[D]. 北京: 清华大学,

- 2000.
- Li Yixiang. Study on double-winding AC-DC synchronous generators[D]. Beijing: Tsinghua University, 2000.
- [7] 王善铭. 交直流混合供电系统运行性能的研究[D]. 北京: 清华大学, 2001.
- Wang Shanming. Study on the performance of synchronous generators with AC and bridge rectified DC output[D]. Beijing: Tsinghua University, 2001.
- [8] 吴旭升. 双绕组三相/十二相电机参数测量研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2000.
- Wu Xusheng. Parameter measurement of three-&twelve-phase generators with double windings[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2000.
- [9] 马伟明, 张盖凡, 刘德志, 等. 三相交流和多相整流同时供电的发电机[P]. 中国专利, ZL 94 107628.8.1999-9.
- Ma Weiming, Zhang Gaifan, Liu Dezhi *et al.* A synchronous machine with simultaneous AC/DC output[P]. The Patent of China, ZL 94 107628.8.1999-9.
- [10] 孙俊忠. 十二相电机不对称突然短路的分析[D]. 武汉: 海军工程大学, 1990.
- Sun Junzhong. The general analysis of unbalanced sudden short circuits of twelve-phase synchronous machines[D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 1990.
- [11] Zhang Gaifan, Ma Weiming. Transient analysis of synchronous machines[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2001.
- [12] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [13] 温增银, 胡会骏. 六相双 Y30°相带绕组同步电机短路的暂态过程[J]. 华中工学院学报, 1974(4): 11-14.
- Wen Zengyin, Hu Huijun. The transients of six-phase synchronous machines with two y-connected stator windings displaced by 30°[J]. Journal of Huazhong Engineering College, 1974(4): 11-14.
- [14] 汤广福, 傅鹏. 六相双 Y 同步电机等效电路及其参数的确定[J]. 中小型电机, 1997, 24(2): 3-6.
- Tang Guangfu, Fu Peng. The equivalent circuits and parameters of six-phase synchronous machines with two Y-connected stator windings[J]. S & M Electric Machines, 1997, 24(2): 3-6.
- [15] Yang Qing, Ma Weiming, Sun Junzhong. Stability analysis of a synchronous generator with simultaneous ac and rectified DC load[C]. ICEMS'2001 Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems. Shenyang, 2001.8.

附录 模拟样机主要参数

额定值:

三相交流绕组:

$$U_{ACN} = 390V, I_{ACN} = 9.44A, \cos\Phi = 0.8(\text{滞后})$$

整流绕组直流侧: $U_{DCN} = 255V, I_{DCN} = 52A$

主要参数(pu):

$$x_{lA} = 0.01794, r_A = 0.03333, x_{Ad} = 0.61248, x_{Aq} = 0.61248$$

$$x_{lmAy1} = 0.005913, x_{lmAy2} = 0.005913, x_{lmAy3} = 0.007804,$$

$$x_{lmAy4} = 0.007804, x_{ly} = 0.02191, r_y = 0.01115,$$

$$x_{lm1} = -1.598 \times 10^{-4}, x_{lm2} = -6.0065 \times 10^{-3}$$

$$x_{lfd} = 0.02506, x_{lfq} = 0.06897, x_{lkd} = 0.01737, x_{lkq} = 0.01737$$

$$r_{fd} = 0.004092, r_{fq} = 0.006255, r_{kd} = 0.0141, r_{kq} = 0.0141$$

$$k = 2.1363$$

收稿日期: 2005-04-19。

作者简介:

孙俊忠(1965-), 男, 博士, 副教授, 从事电机过渡过程、电力电子及电力系统等方面的研究;

马伟明(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 从事独立电源系统、电力电子及电力系统电磁兼容等方面的研究。