

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

孙俊忠,王宗亮,周智勇.
双绕组发电机交流侧带负载时直流侧
突然短路的电磁转矩.
电机与控制应用,2022,49(1):69.

MTST系列 电机型式试验系统



MTST系列 电机型式试验系统①



MTST系列 电机型式试验系统②



MTST系列 电机型式试验系统③



MTST系列 电机型式试验系统④



MTST系列 电机型式试验系统⑤

CS-XY型电机出厂试验测试系统



DZC系列电机定子性能综合测试仪



TZ型电机堵转转矩测试仪



RZJ系列绕组匝间冲击耐电压测试仪



SEARI
上电科



地址: 上海市武宁路505号 传真: 021-62163904

电话: 021-62574990-436、18918357509

邮编: 200063

邮箱: wangcj@seari.com.cn

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.seari.com.cn

双绕组发电机交流侧带负载时直流侧突然短路的电磁转矩

孙俊忠, 王宗亮, 周智勇
(海军潜艇学院 动力系, 山东 青岛 266071)

摘要: 根据双绕组发电机与普通三相同步发电机的内在关系, 参照三相电机突然短路电磁转矩的分析方法, 进行了双绕组发电机交流侧带负载时直流侧突然短路的电磁转矩解析分析, 得到了简明的交变转矩、平均转矩及总电磁转矩的解析式, 并通过试验进行了验证。所得双绕组发电机交流侧带负载时直流侧突然短路电磁转矩的计算式简明、准确、物理意义明确, 特别适合于工程应用。

关键词: 双绕组发电机; 突然短路; 电磁转矩

中图分类号: TM31 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)01-0069-05

doi: 10.12177/emca.2021.168

Electromagnetic Torque of AC Winding Loaded Double-Winding AC-DC Generator Under DC Side Sudden Short Circuit

SUN Junzhong, WANG Zongliang, ZHOU Zhiyong
(Department of Power Engineering, Naval Submarine Academy, Qingdao 266071, China)

Abstract: Based on the essential relation between a 3/12-phase double-winding AC-DC generator and an ordinary 3-phase synchronous generator, according to the method of analyzing the electromagnetic torque of a 3-phase synchronous generator under sudden short circuit, the electromagnetic torque of the 3-phase AC winding loaded double-winding AC-DC generator under DC side sudden short circuit is studied. The concise analytical expressions for alternating, unidirectional and total electromagnetic torques are obtained, which are verified by experiments. These expressions are concise and precise and have clear physical meaning, so they are especially suitable for engineering applications.

Key words: double-winding AC-DC generator; sudden short circuit; electromagnetic torque

0 引言

3/12 相双绕组交直流发电机(简称双绕组发电机), 定子上有两套绕组: 一套是给交流负载供电的三相绕组, 称为交流绕组(用 A、B、C 表示); 另一套是十二相四 Y 移 15° 绕组, 经桥式整流后输出直流电, 称为直流绕组或整流绕组[分别用 a_i 、 b_i 、 c_i ($i=1\sim4$) 表示]。两套绕组共用一个转子^[1-2]。双绕组发电机突然短路后, 会产生巨大

的冲击电流和电磁转矩, 严重危及电机的绕组、主轴、基座及其螺钉等。为了合理设计该类电机及其保护装置, 必须深入研究突然短路后的冲击电流和电磁转矩。突然短路有多种, 例如交直流同时突然短路、交流侧带负载时直流侧突然短路和直流侧带负载时交流侧突然短路等。文献[3-4]研究了交流侧带负载时直流侧突然短路的短路电流, 但没有分析突然短路后的电磁转矩。

交流侧带负载时, 双绕组发电机的电磁耦合

收稿日期: 2021-10-29; 收到修改稿日期: 2021-12-20

作者简介: 孙俊忠(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电机过渡过程分析与电机设计。

关系更加复杂,直流侧突然短路后电磁转矩的暂态分析相当困难。本文将三相电机突然短路电磁转矩的分析方法引申到双绕组发电机情形,对交流侧带负载时直流侧突然短路后的电磁转矩进行解析分析,得到了相对简单的电磁转矩解析计算式,并通过试验进行了检验。

1 分析方法

假设发电机为理想电机,短路前直流侧为空载,交流侧带额定功率因数的三相对称线性负载,其每相电阻和电抗分别为 R 、 X ,并认为短路前后转速和励磁均保持不变。本文分析中,除特别说明者外,各量均用标么值表示。另外,如无特别说明,本文中各符号的意义请参阅文献[3]。

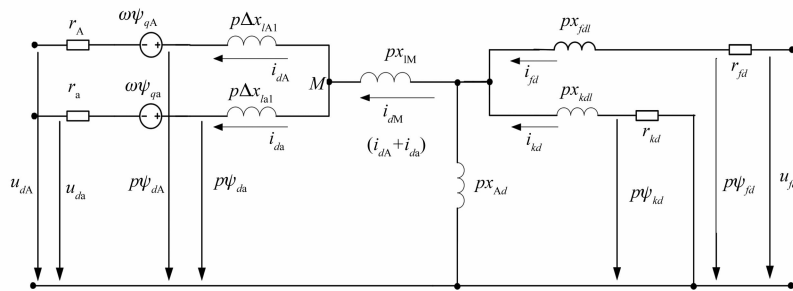


图1 双绕组发电机 d 轴等效电路

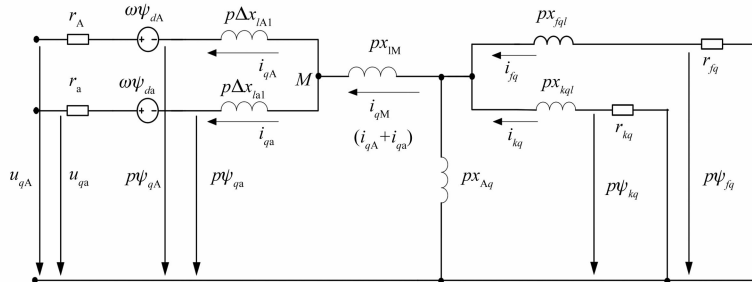


图2 双绕组发电机 q 轴等效电路

2 短路前稳态分析

3/12 相双绕组发电机交流侧带负载直流侧空载稳态运行,与普通三相电机的稳态运行完全相同。因此,稳态运行的电压、电流及磁链为

$$u_{dA0} = x_{qA} i_{qA0} = U_A \sin \delta_A \quad (1)$$

$$u_{qA0} = E_A - x_{dA} i_{dA0} = U_A \cos \delta_A \quad (2)$$

文献[3]给出的短路电流和磁链的解析式很繁杂,使得电磁转矩解析式非常复杂,而且物理意义不明确,很难在工程中应用。图1和图2所示为双绕组发电机 d 、 q 轴等效电路。由图1和图2可见,双绕组发电机相当于具有两条净漏阻抗并联支路的普通三相发电机。本文根据三相电机与双绕组电机的内在关系^[1],应用文献[5]的简化方法:突然短路后的电磁转矩分为交变转矩和平均转矩,计算交变转矩时,可以忽略定转子回路的电阻(只考虑衰减);平均电磁转矩等于定转子回路中交变电流引起的电阻损耗之和;交变转矩与平均转矩之和即为总的电磁转矩。通过适当的近似,对交流侧带负载时直流侧突然短路后的电磁转矩进行解析分析。

$$i_{dA0} \approx \frac{E_A - U_A \cos \delta_A}{x_{dA}} \quad (3)$$

$$i_{qA0} \approx \frac{U_A \sin \delta_A}{x_{qA}} \quad (4)$$

$$\Psi_{dA0} \approx U_A \cos \delta_A \quad (5)$$

$$\Psi_{qA0} \approx -U_A \sin \delta_A \quad (6)$$

式中: δ_A 为 $\dot{U}_A$ 与 jE_A 的夹角; U_A 为交流相电压^[3]。

3 直流侧突然短路的电磁转矩解析分析

3.1 交变转矩

交流侧带负载时直流侧突然短路后两套绕组的 d 、 q 轴短路电流变化量为^[3]

$$i_{da1} = \frac{U_a \cos \delta_a}{x_{daL1}(p)} \mathbf{1} - \frac{U_a e^{-\frac{t}{T_{al1}}}}{x_{daL1}''} \cos(t + \delta_a) \mathbf{1} + \frac{U_a}{\sqrt{R_y^2 + S_L^2}} [\cos(\delta_a - \gamma) - e^{-\frac{t}{T_{al2}}} \cos(t + \delta_a - \gamma)] \mathbf{1} \quad (7)$$

$$i_{dA1} = -\frac{U_a \frac{\Delta x_{mL}}{S_L} \cos \delta_a}{x_{daL1}(p)} \mathbf{1} + \frac{\Delta x_{mL}}{S_L} \frac{U_a e^{-\frac{t}{T_{al1}}}}{x_{daL1}''} \cos(t + \delta_a) \mathbf{1} - \frac{U_a}{\sqrt{R_y^2 + S_L^2}} [\cos(\delta_a - \gamma) - e^{-\frac{t}{T_{al2}}} \cos(t + \delta_a - \gamma)] \mathbf{1} \quad (8)$$

$$i_{qa1} = -\frac{U_a \sin \delta_a}{x_{qaL1}(p)} \mathbf{1} + \frac{U_a e^{-\frac{t}{T_{al1}}}}{x_{qaL1}''} \sin(t + \delta_a) \mathbf{1} - \frac{U_a}{\sqrt{R_y^2 + S_L^2}} [\sin(\delta_a - \gamma) - e^{-\frac{t}{T_{al2}}} \sin(t + \delta_a - \gamma)] \mathbf{1} \quad (9)$$

$$i_{qA1} = \frac{\Delta x_{mL}}{S_L} \frac{U_a \sin \delta_a}{x_{qaL1}(p)} \mathbf{1} - \frac{\Delta x_{mL}}{S} \frac{U_a e^{-\frac{t}{T_{al1}}}}{x_{qaL1}''} \sin(t + \delta_a) \mathbf{1} + \frac{U_a}{\sqrt{R_y^2 + S_L^2}} [\sin(\delta_a - \gamma) - e^{-\frac{t}{T_{al2}}} \sin(t + \delta_a - \gamma)] \mathbf{1} \quad (10)$$

式中:下标“1”表示突加反电压后的变化量;“1”

代表单位阶跃函数; $\gamma = \arctan \frac{R_y}{S_L}$ 。

因为 $R_y = R + r_A + r_a$, $S_L = \Delta x_{la1} + \Delta x_{laL1}$, $x_{laL1} = x_{la} + X$, $\Delta x_{laL1} = x_{laL1} - x_{laMa}$, 在额定功率因数附近时, 通常有 $R_y \approx R$, $S_L \approx X$, 所以 $\gamma \approx \arctan \frac{R}{X}$, 即 γ 主要是由负载性质决定的。

上面的短路电流表达式太复杂, 如果用来计算短路后的电磁转矩, 得到的表达式会非常复杂, 难以应用。为此, 本文进行合理简化。

通常 $\sqrt{R_y^2 + S_L^2}$ 数值较大, 且含 $e^{-\frac{t}{T_{al2}}}$ 的项衰减很快, $\frac{k}{4} U_a \left\{ \frac{\cos(\theta - \delta_a + \gamma)}{\sqrt{R_y^2 + S_L^2}} - \frac{\cos(\theta_0 - \delta_a + \gamma)}{\sqrt{R_y^2 + S_L^2}} e^{-\frac{t}{T_{al2}}} \right\}$ 很小, 对最大短路电流的贡献小, 可以考虑将其忽略; 同时, 令 $x_{daL1}'' \approx x_{qaL1}''$ (超瞬变 d 、 q 电抗近似相等), 可进一步简化。于是可得到短路电流变化量的简明近似表达式:

$$i_{da1} \approx \frac{U_a \cos \delta_a}{x_{daL1}(p)} \mathbf{1} - \frac{U_a e^{-\frac{t}{T_{al1}}}}{x_{daL1}''} \cos(t + \delta_a) \mathbf{1} \quad (11)$$

$$i_{dA1} \approx -\frac{U_a \frac{\Delta x_{mL}}{S_L} \cos \delta_a}{x_{daL1}(p)} \mathbf{1} + \frac{\Delta x_{mL}}{S_L} \frac{U_a e^{-\frac{t}{T_{al1}}}}{x_{daL1}''} \cos(t + \delta_a) \mathbf{1} \quad (12)$$

$$i_{qa1} \approx -\frac{U_a \sin \delta_a}{x_{qaL1}(p)} \mathbf{1} + \frac{U_a e^{-\frac{t}{T_{al1}}}}{x_{qaL1}''} \sin(t + \delta_a) \mathbf{1} \quad (13)$$

$$i_{qA1} \approx \frac{\Delta x_{mL}}{S_L} \frac{U_a \sin \delta_a}{x_{qaL1}(p)} \mathbf{1} - \frac{\Delta x_{mL}}{S} \frac{U_a e^{-\frac{t}{T_{al1}}}}{x_{qaL1}''} \sin(t + \delta_a) \mathbf{1} \quad (14)$$

根据叠加原理, 短路后等效三相电机的 d 、 q 轴短路电流为

$$i_{dM1} = i_{dA1} + i_{da1} \quad (15)$$

$$i_{qM1} = i_{qA1} + i_{qa1} \quad (16)$$

$$i_{dM} = i_{dA1} + i_{da1} + i_{dA0} \quad (17)$$

$$i_{qM} = i_{qA1} + i_{qa1} + i_{qA0} \quad (18)$$

由文献[3]的矢量图可知, 通常交流绕组的净漏阻抗 (r_A , Δx_{la1}) 较小, 可近似认为 $U_a \approx U_A$, $\delta_a \approx \delta_A$, $x_{dA} \approx x_{daL1}$, $x_{qA} \approx x_{qaL1}$, 因此短路前的负载电流式(3)和式(4)可改为

$$i_{dA0} \approx \frac{E_A - U_A \cos \delta_A}{x_{dA}} \approx \frac{E_A - U_a \cos \delta_a}{x_{daL1}} \quad (19)$$

$$i_{qA0} \approx \frac{U_A \sin \delta_A}{x_{qA}} \approx \frac{U_a \sin \delta_a}{x_{qaL1}} \quad (20)$$

通常, 式(12)和式(14)中的 $\frac{\Delta x_{mL}}{S_L}$ (=

$\frac{\Delta x_{la1} \Delta x_{laL1}}{\Delta x_{la1} + \Delta x_{laL1}}$) 很小, 可以忽略与其有关的量 (即忽略 i_{dA1} 、 i_{qA1})。将式(11)、式(13)、式(19)、式

(20)代入式(17)、式(18)得:

$$i_{dM} \approx i_{da1} + i_{da0} = \frac{E_A}{x_{daL1}} + \left[\left(\frac{1}{x''_{daL1}} - \frac{1}{x'_{daL1}} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \left(\frac{1}{x'_{daL1}} - \frac{1}{x_{daL1}} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} \right] U_a \cos \delta_a - \frac{e^{-\frac{t}{T_{al1}}} U_a}{x''_{daL1}} \cos(t + \delta_a) \quad (21)$$

$$i_{qM} \approx i_{qa1} + i_{qa0} = - \left[\left(\frac{1}{x''_{qaL1}} - \frac{1}{x'_{qaL1}} \right) e^{-\frac{t}{T_q}} + \left(\frac{1}{x'_{qaL1}} - \frac{1}{x_{qaL1}} \right) e^{-\frac{t}{T_q}} \right] U_a \sin \delta_a + \frac{U_a}{x''_{qaL1}} e^{-\frac{t}{T_{al1}}} \sin(t + \delta_a) \quad (22)$$

突然短路后的 d, q 轴磁链变化量为^[1]

$$\begin{cases} \Psi_{da1} = -x_{dM}(p)i_{dM1} - \Delta x_{la1}i_{da1} \\ \Psi_{qa1} = -x_{qM}(p)i_{qM1} - \Delta x_{la1}i_{qa1} \\ \Psi_{dA1} = -x_{dM}(p)i_{dM1} - \Delta x_{lA1}i_{dA1} \\ \Psi_{qA1} = -x_{qM}(p)i_{qM1} - \Delta x_{lA1}i_{qA1} \end{cases} \quad (23)$$

忽略漏磁链的影响,近似认为 $x_{dM}(p) \approx x_{da}(p)$ 、 $x_{qM}(p) \approx x_{qa}(p)$ 。考虑到交流侧带负载时直流侧突然短路后的直流侧短路电流很大,而交流侧电流很小^[3],令 $i_{dM1} \approx i_{da1} \approx i_{dA1}$ 、 $i_{qM1} \approx i_{qa1} \approx i_{qA1}$,因此有

$$\begin{cases} \Psi_{da1} = -x_{dM}(p)i_{dM1} - \Delta x_{la1}i_{da1} \approx -x_{da}(p)i_{da1} \\ \Psi_{qa1} = -x_{qM}(p)i_{qM1} - \Delta x_{la1}i_{qa1} \approx -x_{qa}(p)i_{qa1} \\ \Psi_{dA1} = -x_{dM}(p)i_{dM1} - \Delta x_{lA1}i_{dA1} \approx -x_{da}(p)i_{da1} \\ \Psi_{qA1} = -x_{qM}(p)i_{qM1} - \Delta x_{lA1}i_{qA1} \approx -x_{qa}(p)i_{qa1} \end{cases} \quad (24)$$

忽略转子回路对交流分量的电阻,即认为 $x_{da}(p) \approx x''_{da}$ 、 $x_{qa}(p) \approx x''_{qa}$,由式(11)、式(13)和式

$$\begin{aligned} M_{ad-} &= (i_{qA} \Psi_{dA} - i_{dA} \Psi_{qA}) + (i_{qA} \Psi_{da} - i_{da} \Psi_{qa}) = i_{qM} \Psi_{dA} - i_{dM} \Psi_{qA} = \\ &\left\{ \frac{E_A}{x_{daL1}} + \left[\left(\frac{1}{x''_{daL1}} - \frac{1}{x'_{daL1}} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \left(\frac{1}{x'_{daL1}} - \frac{1}{x_{daL1}} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} \right] U_a \cos \delta \right\} U_a e^{-\frac{t}{T_{al1}}} \sin(t + \delta_a) - \\ &\left[\left(\frac{1}{x''_{qaL1}} - \frac{1}{x'_{qaL1}} \right) e^{-\frac{t}{T_q}} + \left(\frac{1}{x'_{qaL1}} - \frac{1}{x_{qaL1}} \right) e^{-\frac{t}{T_q}} \right] U_a^2 \sin \delta_a e^{-\frac{t}{T_{al1}}} \cos(t + \delta_a) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_{daL1}} - \frac{1}{x''_{qaL1}} \right) U_a^2 e^{-\frac{2t}{T_{al1}}} \sin 2(t + \delta_a) \end{aligned} \quad (29)$$

3.2 平均转矩

根据三相电机突然短路平均转矩的物理意义^[5](即平均转矩等于定转子回路交变电流引起的电阻损耗),可直接得到双绕组发电机交流侧带负载时直流侧突然短路的平均电磁转矩为

$$M_{alav} = (|i_{s1}|^2 + |i_{s2}|^2) R_{AaL} + \frac{1}{2} (|I_{d1}|^2 R_d + |I_{q1}|^2 R_q) \quad (30)$$

其中:

(23)可得短路后磁链变化量:

$$\begin{aligned} \Psi_{dA1} &\approx \Psi_{da1} \approx \Psi_{dM1} \approx \\ &-U_a \cos \delta_a + U_a e^{-\frac{t}{T_{al1}}} \cos(t + \delta_a) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{qA1} &\approx \Psi_{qa1} \approx \Psi_{qM1} \approx \\ &U_a \sin \delta_a - U_a e^{-\frac{t}{T_{al1}}} \sin(t + \delta_a) \end{aligned} \quad (26)$$

短路后总的磁链为

$$\begin{aligned} \Psi_{dA} &\approx \Psi_{da} \approx \Psi_{dM} \approx \\ \Psi_{dA0} + \Psi_{dA1} &= U_a e^{-\frac{t}{T_{al1}}} \cos(t + \delta_a) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\Psi_{qA} \approx \Psi_{qa} \approx \Psi_{qM} \approx$$

$$\Psi_{qA1} + \Psi_{qA0} = -U_a e^{-\frac{t}{T_{al1}}} \sin(t + \delta_a) \quad (28)$$

参照三相电机交变转矩的计算方法^[5],即忽略定转子回路的电阻(只考虑衰减),应用上面得出的电流和磁链的表达式(21)、式(22)、式(26)、式(27),可得交流侧带负载时直流侧突然短路的交变电磁转矩 M_{ad-} :

$$\begin{aligned} |i_{s1}|^2 &= \left\{ \frac{E_A}{x_{daL1}} + \left[\left(\frac{1}{x''_{daL1}} - \frac{1}{x'_{daL1}} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} + \left(\frac{1}{x'_{daL1}} - \frac{1}{x_{daL1}} \right) e^{-\frac{t}{T_d}} \right] U_a \cos \delta_a \right\}^2 + \\ &\left[\left(\frac{1}{x''_{qaL1}} - \frac{1}{x'_{qaL1}} \right) e^{-\frac{t}{T_q}} + \left(\frac{1}{x'_{qaL1}} - \frac{1}{x_{qaL1}} \right) e^{-\frac{t}{T_q}} \right] U_a \sin \delta_a \right\}^2 \end{aligned} \quad (31)$$

$$|i_{s2}|^2 = \left\{ \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_{daL1}} - \frac{1}{x''_{qaL1}} \right) e^{-\frac{t}{T_{al1}}} \right] U_a e^{-\frac{t}{T_{al1}}} \right\}^2 \quad (32)$$

$$I_{d1} = \frac{U_a}{x''_{daL1}} e^{-\frac{t}{T_{daL1}}} \quad (33)$$

$$I_{q1} = \frac{U_a}{x''_{qaL1}} e^{-\frac{t}{T_{qaL1}}} \quad (34)$$

$$R_d = x''_{daL1} \left(\frac{1}{T'_d} + \frac{1}{T''_d} - \frac{1}{T'_{d0}} - \frac{1}{T''_{d0}} \right) \quad (35)$$

$$R_q = x''_{qaL1} \left(\frac{1}{T'_q} + \frac{1}{T''_q} - \frac{1}{T'_{q0}} - \frac{1}{T''_{q0}} \right) \quad (36)$$

有关参数的意义请参阅文献[3], 特别说明如下: R_{aL} 为两净漏阻抗支路(交流绕组的净漏阻抗含负载的阻抗)并联的等效电阻, $R_{aL} = \frac{\Delta x_{aL} r_{AL} + \Delta x_{AL} r_a}{S_L}$, $S_L = \Delta x_{la1} + \Delta x_{laL1}$, $\Delta x_{aL} = \frac{\Delta x_{la1}^2}{S_L}$, $\Delta x_{AL} = \frac{\Delta x_{laL1}^2}{S_L}$, $r_{AL} = r_A + R_O$ 。

3.3 总电磁转矩

交流侧带负载时直流侧突然短路的电磁转矩 M_{al} 为

$$M_{al} = M_{al\sim} + M_{alav} \quad (37)$$

4 试验验证

通过模拟样机试验, 检验解析分析的准确性。模拟样机主要参数(标么值)为: $x_{lA} = 0.017\ 94$, $r_A = 0.033\ 33$, $x_{Ad} = 0.612\ 48$, $x_{Aq} = 0.612\ 48$, $x_{lmAy1} = 0.005\ 913$, $x_{lmAy2} = 0.005\ 913$, $x_{lmAy3} = 0.007\ 804$, $x_{lmAy4} = 0.007\ 804$, $x_{ly} = 0.021\ 91$, $r_y = 0.011\ 15$, $x_{lm1} = -1.598 \times 10^{-4}$, $x_{lm2} = -6.006\ 5 \times 10^{-3}$, $x_{lfd} = 0.025\ 06$, $x_{lfq} = 0.068\ 97$, $x_{lk d} = 0.017\ 37$, $x_{lk q} = 0.017\ 37$, $r_{fd} = 0.004\ 092$, $r_{fq} = 0.006\ 255$, $r_{kd} = 0.014\ 1$, $r_{kq} = 0.014\ 1$, $k = 2.136\ 3$ 。

试验条件为: 双绕组模拟样机由直流电动机拖动(额定转速), 他励, 在交流侧带负载情况下, 直流侧突然短路。利用转矩测量仪和计算机高速数据采集系统采集短路后的转矩实时波形。试验测试与解析计算结果的对比如表1所示。突然短路电磁转矩实测波形如图3所示。

由表1和图3可见: 解析计算结果的误差基本在工程允许范围内, 与试验结果吻合较好。因此, 本文的解析分析是准确的。

表1 交流侧带负载时直流侧突然短路的电磁转矩测试结果与解析计算结果比较

U_{AB}/V	I_A/A	$\cos \varphi$	实测最大 转矩/(p.u.)	计算最大 转矩/(p.u.)	计算 误差/%
60	4.0	0.8	0.80	0.73	8.8
70	4.7	0.8	1.05	1.14	8.6
84	5.8	0.8	1.53	1.43	6.5

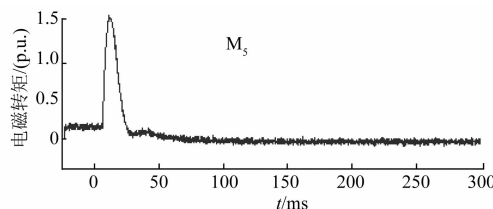


图3 交流侧带负载时直流侧突然短路电磁转矩实测波形

5 结 语

本文将三相电机突然短路电磁转矩的分析方法引申过来, 提出了一种简明实用、物理意义明确的3/12相双绕组发电机交流侧带负载时直流侧突然短路的电磁转矩的解析分析方法, 给出了比较简明的交变转矩、平均转矩和总转矩的计算公式。通过试验测试进行了验证, 结果表明本文所得的解析计算式适合工程应用。

【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, 23(1): 93.
- [2] 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.
- [3] 孙俊忠, 刘爱华. 双绕组发电机交流侧带负载直流侧突然短路流侧突然短路的分析[J]. 华北电力大学学报, 2011, 38(1): 44.
- [4] 孙俊忠, 王辉波, 周智勇. 双绕组发电机交流侧负载对直流侧突然短路电流的影响分析[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(4): 112.
- [5] ZHANG G, MA W. Transient analysis of synchronous machines [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2001.