

船舶轴带无刷双馈电机短路电流分析与保护设计^{*}

高国章, 高志国, 高 岚

(武汉理工大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430063)

摘 要: 当船舶轴带无刷双馈电机(BDFG)功率绕组发生三相短路故障时, 短路电流会对系统造成较大的危害。因此, 有必要设计专门的保护电路保障系统的安全。利用空间旋转坐标系, 建立船舶轴带 BDFG 功率绕组三相短路时的动态方程, 并依据磁链守恒定律研究系统短路电流的变化特性。通过分析短路电流的各个分量, 提出加入撬棒电阻和直流卸载电路的保护方式来卸载过电流, 并进一步研究加入保护电路后的电流变化特性。以 1 台 30 kVA 的 BDFG 为仿真对象, 运用 MATLAB/Simulink 进行模型仿真和理论值计算, 验证了保护电路的有效性, 对船舶轴带 BDFG 电气安全设计具有指导意义。

关键词: 无刷双馈电机; 三相短路电流; 暂态分析; 保护电路

中图分类号: TM 307⁺.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)08-0096-09

Short-Circuit Current Analysis and Protection Design of Ship Shaft Brushless Doubly-Fed Generator^{*}

GAO Guozhang, GAO Zhiguo, GAO Lan

(School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: When a three-phase short-circuit fault occurred on the ship shaft with a brushless doubly-fed generator (BDFG), the short-circuit current would cause a great hazard to the system. Therefore, it was necessary to design a special protection circuit to ensure the safety of the system. Based on the space rotating coordinate system, the dynamic equation of the three-phase short circuit on the power winding of the ship shaft with BDFG was established, and the variation characteristics of the system short-circuit current were studied according to the law of magnetic flux conservation by analyzing the components of the short-circuit current. It was proposed to add the crowbar resistor and the DC unloading circuit to unload the overcurrent, and the current variation characteristics were further studied after adding the protection circuit. A 30 kVA BDFG was used as the simulation object. Model simulation and theoretical value calculation were carried out by MATLAB/Simulink. The effectiveness of the protection circuit was verified. It was instructive for the electrical safety design of the ship shaft with BDFG.

Key words: brushless double-fed generator (BDFG); three-phase short-circuit current; transient analysis; protection circuits

0 引 言

船舶作为能源消耗设备, 节能减排在船舶上的研究和应用是船舶发展的必然趋势。船舶轴带

无刷双馈发电系统能够充分保证船舶主推进装置工作于额定功率, 进而利用冗余功率发电达到节能减排的目的^[1]。船舶轴带发电可在 60% ~ 105% 额定转速的转速区间内利用变流器组达到

^{*} 基金项目: 船舶动力工程技术交通运输行业重点实验室开放基金项目(KLMPET2018-02); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2019 III 046CX)

作者简介: 高国章(1972—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新型电机控制及控制工程。

高志国(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子传动及电机控制。

高 岚(1965—), 女, 博士, 教授, 研究方向为船舶电力系统稳定性。

变速恒频恒压的效果^[2]。

随着双馈电机在风电领域的广泛应用,双馈发电技术在船舶轴带中的应用也得到了快速发展^[3-4]。在船舶电力系统实际运行时,线路进水、绝缘层自然老化等均会造成短路故障,且船舶主要采用三相三线制,因此发生三相短路的几率较高。当轴带无刷双馈电机(BDFG)功率绕组(PW)发生三相短路时,如果BDFG独立在网,将造成系统解列导致全船失电;当与柴发机组并网运行,将破坏电网的电能质量。同时强大的短路电流可能会击穿直流母线电容,对发电机及其变流器组等设备造成损害甚至烧毁^[5]。

研究系统的短路过程,对稳态的研究已不能反映系统在瞬时的变化过程,因此需要暂态模型及对系统的暂态分析来明确短路时暂态量的变化^[6-7]。针对BDFG的研究,一般还集中在对系统稳态上,对暂态和故障的研究甚少。目前研究较多的是陆上风电中有刷双馈电机(DFIG)的暂态和故障工况。文献[8]通过空间矢量描述,对DFIG功率绕组三相短路过程中的暂态量进行了解析,推导出了短路电流表达式,并提出在转子侧串入保护电阻,但并未分析串入保护电路后的暂态量变化。文献[9-10]提出在转子侧采用撬棒保护来对DFIG系统变流器组进行防护。文献[11]在风电机组变流器直流母线上接入直流卸荷电路保护装置,并进行了直流卸荷电路装置的暂态控制性能测试。文献[12]分别研究了风电场中机组在不同位置发生短路故障时DFIG的定子和转子的电流解析式,并考虑了近端时采用撬棒保护电阻对电路的影响。文献[13]在撬棒保护电路的基础上分别进行了暂态电流表达式的计算,并详细分析了撬棒电阻对暂态电流的影响。文献[14]提出使用变阻值撬棒保护方案减小DFIG对无功的吸收,以达到稳定网侧电压的目的。

本文通过风电场短路的暂态研究,对船舶轴带BDFG的功率绕组短路工况进行分析计算。在精确数学模型的基础上,通过暂态磁链和电流的计算推导,得到暂态电流表达式,再通过分析暂态电磁量,提出不同于风机的保护电路设计思路,并进行了加入保护电路后的电流暂态量分析。最后进行MATLAB/Simulink仿真验证了本文计算的

正确性和设计的可行性。

1 BDFG 短路电流分析

1.1 BDFG 系统不含保护电路的结构模型

BDFG系统主要由BDFG、控制绕组(CW)侧变流器、功率绕组侧变流器、变压器、电网组成,如图1所示。在不含保护电路时,BDFG定子功率绕组通过功率绕组侧变流器、直流母线和控制绕组侧变流器后,与定子控制绕组连接进行定子励磁,进而实现变速恒频恒压的目的。

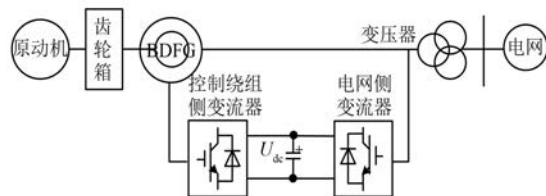


图1 BDFG系统图

在BDFG系统中,按主导元件响应机理的不同,系统可分为机械传动系统(含原动机和轴系)、BDFG和变流器组的暂态响应三部分^[15]。发电机的电磁暂态响应主要表现为2套定子绕组和转子绕组电压、磁链、电流的变化,变流器组的暂态响应过程主要表现为控制绕组侧变流器对BDFG的动态励磁控制和功率绕组侧变流器对直流母线电压的稳定控制。

因为BDFG定子电路复杂,属于多耦合系统,所以在研究短路的暂态过程中,采用静止abc坐标系下的模型比较复杂,本文引入空间旋转坐标系,采用空间矢量的描述形式来研究该暂态过程。

该空间坐标系中,令功率绕组为 p_α 、 p_β ,控制绕组为 c_α 、 c_β ,转子绕组为 r_α 、 r_β ,矢量值均标示在各自的复平面内,以两相轴系 d - q 表示,各坐标轴之间的关系如图2所示。

各绕组在相应的复平面坐标系内,各自的电压和磁链的动态方程为^[16]

$$u_{pk} = R_p i_{pk} + \frac{d\psi_{pk}}{dt} + j\omega_k \psi_{pk} \quad (1)$$

$$u_{ck} = R_c i_{ck} + \frac{d\psi_{ck}}{dt} + j[\omega_k - (p_p + p_c)\omega_r] \psi_{ck} \quad (2)$$

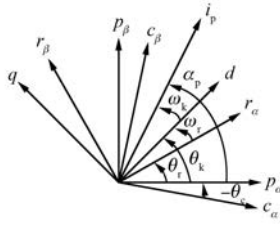


图2 系统坐标轴之间的关系

$$u_{rk} = R_r i_{rk} + \frac{d\psi_{rk}}{dt} + j(\omega_k - p_p \omega_r) \psi_{ck} \quad (3)$$

$$\psi_{pk} = L_p i_{pk} + L_{pr} i_{rk} \quad (4)$$

$$\psi_{ck} = L_c i_{ck} + L_{cr} i_{rk} \quad (5)$$

$$\psi_{rk} = L_{pr} i_{pk} + L_{cr} i_{ck} + L_r i_{rk} \quad (6)$$

式中: u 、 i 、 ψ ——各绕组的电压、电流、磁链,属空间矢量;

R 、 L ——各绕组的电阻、电容,为标量值;

下标 p 、 c 、 r ——功率绕组、控制绕组、转子绕组;

下标 pk 、 ck 、 rk ——各矢量值在空间旋转坐标系中的表示;

ω_k 、 ω_r ——任意坐标系和转子坐标系参考功率绕组的旋转角频率;

p_p 、 p_c ——功率绕组和控制绕组极对数;

L_p 、 L_c 、 L_r ——功率绕组、控制绕组、转子绕组自感;

L_{pr} 、 L_{cr} ——两定子绕组与转子绕组的互感。

联立式(4)~式(6),可得功率绕组、控制绕组及转子绕组电流为

$$i_{pk} = \frac{1}{k} [(L_c L_r - L_{cr}^2) \psi_{pk} + L_{pr} L_{cr} \psi_{ck} - L_{pr} L_c \psi_{rk}] \quad (7)$$

$$i_{ck} = \frac{1}{k} [L_{pr} L_{cr} \psi_{pk} + (L_p L_r - L_{pr}^2) \psi_{ck} - L_p L_{cr} \psi_{rk}] \quad (8)$$

$$i_{rk} = \frac{1}{k} (-L_{pr} L_c \psi_{pk} - L_p L_{cr} \psi_{ck} + L_p L_c \psi_{rk}) \quad (9)$$

其中: $k = L_p L_c L_r - L_{pr}^2 L_{cr} - L_c L_{pr}^2$ 。

将式(7)~式(9)进一步化简后,得:

$$i_{pk} = \frac{1}{L'_{sp}} (\psi_{pk} + K_{pc} \psi_{ck} - K_{pr} \psi_{rk}) \quad (10)$$

$$i_{ck} = \frac{1}{L'_{sc}} (K_{cp} \psi_{pk} + \psi_{ck} - K_{cr} \psi_{rk}) \quad (11)$$

$$i_{rk} = \frac{1}{L'_r} (K_p \psi_{pk} + K_c \psi_{ck} - \psi_{rk}) \quad (12)$$

式中: L'_{sp} 、 L'_{sc} 、 L'_r ——功率绕组、控制绕组和转子

绕组的暂态电感, $L'_{sp} = L_p - \frac{L_c L_{pr}^2}{L_c L_r - L_{cr}^2}$, $L'_{sc} =$

$$L_c - \frac{L_p L_{cr}^2}{L_p L_r - L_{pr}^2}, L'_r = L_r - \frac{L_{cr}^2}{L_c} - \frac{L_{pr}^2}{L_p};$$

K_{pc} 、 K_{pr} 、 K_{cp} 、 K_{cr} 、 K_p 、 K_c ——各绕组之间的

电感耦合系数, $K_{pc} = \frac{L_{pr} L_{cr}}{L_c L_r - L_{cr}^2}$, $K_{pr} =$

$$\frac{L_{pr} L_c}{L_c L_r - L_{cr}^2}, K_p = \frac{L_{pr}}{L_p}, K_{cp} = \frac{L_{rp} L_{rc}}{L_p L_r - L_{rp}^2}, K_{cr} =$$

$$\frac{L_{rp} L_{rc}}{L_p L_r - L_{rp}^2}, K_c = \frac{L_{rc}}{L_c}。$$

在系统出现短路故障的瞬间,由磁链守恒定律可知,BDFG的各绕组磁链值将在故障前后保持不变。据此,通过求得故障前的磁链值,便可得知故障后各绕组的磁链初值,进而结合式(10)~式(12)可确定故障过程中暂态电流的相应变化。

1.2 BDFG 故障前后暂态分析

当轴带 BDFG 发生短路时,故障一般在毫秒级发生,因此在短路发生期间可以认为电机转子转速为定值,即 n_r 保持不变。假定三相对称短路故障发生在零时刻,短路点发生于 BDFG 功率绕组侧,故障前电机正常发电并与船舶电网相连。在电机发生短路故障时,绕组中的磁链一般由稳态分量 ψ_{1k} 和暂态分量 ψ_{2k} 两大类分量组成,暂态分量又包含暂态直流分量与转子频率分量^[17-18]。

因为功率绕组侧电角速度较为稳定,所以本文选取任意坐标系以功率绕组电角速度旋转,即 $\omega_k = \omega_p$ 。为了方便后续研究,将转子绕组和控制绕组侧电量通过频率折算和绕组折算理论折算到功率绕组侧,折算后的 BDFG 暂态等效电路如图3所示。转子绕组侧和控制绕组侧折算量分别以“'”和“”表示。

1.2.1 三相短路前磁链分析

在描述 BDFG 的暂态过程时,BDFG 功率绕组、控制绕组和转子绕组的暂态时间常数分别以 τ_p 、 τ_c 和 τ_r 表示:

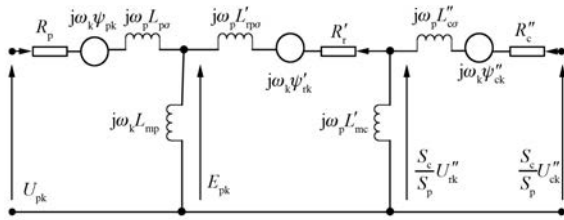


图3 BDFG 暂态等效电路

$$\begin{cases} \tau_p = \frac{L'_p}{R_p} \\ \tau_c = \frac{L'_c}{R_c} \\ \tau_r = \frac{L'_r}{R_r} \end{cases} \quad (13)$$

在短路前,假设 BDFG 正常并网,稳定发电,功率绕组端电压 U_{pk0^-} 和电流 I_{pk0^-} 均为额定值,可表示为

$$\begin{cases} U_{pk0^-} = 1 \text{ p.u.} \\ I_{pk0^-} = 1 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (14)$$

在图 2 坐标系中,BDFG 稳定运行时,功率绕组侧电压和磁链同步旋转,因此功率绕组磁链的变化率 $\frac{d\psi_{pk}}{dt} = 0$,稳定运行时功率绕组磁链值中仅包含稳态分量。功率绕组 R_p 较小,忽略不计。三相短路发生前,式(1)变化为 $u_{pk} = j\omega_k \psi_{pk}$,可得:

$$\psi_{pk0^-} = \frac{U_{pk0^-}}{j\omega_k} \quad (15)$$

式中: ψ_{pk0^-} ——短路前功率绕组的磁链稳态分量初始值。

同理,折算到功率绕组侧,控制绕组在短路前的磁链稳态分量初值 ψ_{ck0^-} :

$$\psi_{ck0^-} = \frac{U_{ck0^-}''}{j\omega_k} \quad (16)$$

因为 BDFG 转子绕组自短接,即 $u_{rk} = 0$,所以分析转子绕组磁链值时需借助与定子绕组耦合的关系。分析图 3 等效电路,再结合戴维南定理,可得功率绕组侧等效阻抗 $Z_p = R_p + j\omega_k L'_p$,同理可得控制绕组侧等效阻抗 $Z_c'' = R_c'' + j\omega_k L_{sc}''$ 。

在进行转子绕组磁链值的计算时,与定子绕组分析有所不同。在 BDFG 中,转子绕组可分为与定子 2 套绕组相对应的两部分:与功率绕组相

对应的转子功率绕组和与控制绕组相对应的转子控制绕组。由于 BDFG 特殊的内部结构,转子绕组的磁链值将由相应的两部分组成:

$$\psi_{rk0^-}' = \frac{(U_{pk0^-} - Z_p I_{pk0^-}) L'_r}{j\omega_k L'_{pr}} + \frac{(U_{ck0^-}'' - Z_c'' I_{ck0^-}'') L'_r}{j\omega_k L'_{cr}} \quad (17)$$

1.2.2 三相短路时的暂态分析

假设在 t_0 瞬间,BDFG 功率绕组三相短路,功率绕组电压 U_{pk0^-} 将发生瞬间跌落,定义跌落系数为 p ($0 \leq p \leq 1$),那么跌落后的功率绕组电压 U_{pk0^+} 为

$$U_{pk0^+} = (1 - p) U_{pk0^-} \quad (18)$$

短路后功率绕组的磁链值稳态分量 ψ_{pk0^+} 为

$$\psi_{pk0^+} = \frac{(1 - p) U_{pk0^-}}{j\omega_k} \quad (19)$$

由式(18)和式(19)可知,在短路发生后, U_{pk0^+} 、 ψ_{pk0^+} 均减小。根据磁链守恒定理有:

$$\psi_{pk0^-} = \psi_{pk0^+} \quad (20)$$

因此,在短路过程中,功率绕组磁链值必然产生了能够弥补稳态分量的暂态直流分量和交流分量,其中直流分量将以时间常数 τ_p 衰减,暂态直流分量初始值为

$$\psi_{p2kf} = \psi_{pk0^-} - \psi_{pk0^+} = \frac{p U_{pk0^-}}{j\omega_k} e^{j\omega_k t} \quad (21)$$

结合式(13)的功率绕组暂态时间常数 τ_p ,可得功率绕组磁链的暂态量表达式:

$$\psi_{p2k0^+} = \frac{p U_{pk0^-}}{j\omega_k} e^{-t/\tau_p} \quad (22)$$

由式(19)和式(22)可得暂态过程中功率绕组磁链方程为

$$\psi_{pk0^+} = \frac{(1 - p) U_{pk0^-}}{j\omega_k} e^{j\omega_k t} + \frac{p U_{pk0^-}}{j\omega_k} e^{-t/\tau_p} \quad (23)$$

对于控制绕组来说,假设图 1 中直流母线上电容存放电量较小,在功率绕组短路后迅速对控制绕组放电,使控制绕组与功率绕组的暂态在同一时间发生,即忽略直流母线电容对控制绕组的影响。与功率绕组推导过程同理,可得控制绕组在暂态过程中的磁链方程为

$$\psi_{ck0^+} = \frac{U_{ck0^+}''}{j\omega_k} e^{j\omega_k t} + \frac{U_{ck0^-}'' - U_{ck0^+}''}{j\omega_k} e^{-t/\tau_c} \quad (24)$$

转子功率绕组将在定子功率绕组短路的影响下产生暂态衰减,初值为稳态时的磁链值;同理,

转子控制绕组也将产生同样的过程。由此转子磁链可表述为

$$\psi_{rk0+} = \left[\frac{(U''_{ck0-} - Z''_c I''_{ck0}) L'_r}{j\omega_k L''_{cr}} + \frac{(U_{pk0-} - Z_p I_{pk0}) L'_r}{j\omega_k L'_{pr}} \right] e^{j\omega_k t} e^{-t/\tau_r} \quad (25)$$

1.3 短路电流计算

结合式(10)、式(23)~(25),可得BDFG在功率绕组三相短路时功率绕组暂态电流为

$$i_{pk} = \frac{1}{L'_{sp}} \left\{ \left[\frac{(1-p)U_{pk0-}}{j\omega_k} e^{j\omega_k t} + \frac{pU_{pk0-}}{j\omega_k} e^{-t/\tau_p} \right] + K_{pc} \left(\frac{U''_{ck0+}}{j\omega_k} e^{j\omega_k t} + \frac{U''_{ck0-} - U''_{ck0+}}{j\omega_k} e^{-t/\tau_c} \right) - K_{pr} \left[\frac{(U''_{ck0-} - Z''_c I''_{ck0}) L'_r}{j\omega_k L''_{cr}} + \frac{(U_{pk0-} - Z_p I_{pk0}) L'_r}{j\omega_k L'_{pr}} \right] e^{j\omega_k t} e^{-t/\tau_r} \right\} \quad (26)$$

在图2的坐标系中各绕组以 $d-q$ 两相轴系表示,根据空间矢量变换法则,将式(26)的 $d-q$ 轴系转换为 abc 轴系,整理后再取三相电流中的A相电流 i_{pa} 进行分析,表达式为

$$i_{pa} = \frac{1}{L'_{sp}} (i_{pa1} + i_{pa2} + i_{pa3}) \quad (27)$$

i_{pa1} 、 i_{pa2} 、 i_{pa3} 分别为

$$\left\{ \begin{aligned} i_{pa1} &= \frac{(1-p)U_{pk0-}}{j\omega_k} \cos(\omega_k t + \alpha) + K_{pc} \frac{U''_{ck0+}}{j\omega_k} \cos(\omega_k t + \alpha) \\ i_{pa2} &= \frac{pU_{pk0-}}{j\omega_k} \cos\alpha e^{-t/\tau_p} + K_{pc} \frac{U''_{ck0-} - U''_{ck0+}}{j\omega_k} \cos\alpha e^{-t/\tau_c} \\ i_{pa3} &= -K_{pr} \left[\frac{(U''_{ck0-} - Z''_c I''_{ck0}) L'_r}{j\omega_k L''_{cr}} + \frac{(U_{pk0-} - Z_p I_{pk0}) L'_r}{j\omega_k L'_{pr}} \right] \cos(\omega_k t + \alpha) e^{-t/\tau_r} \end{aligned} \right. \quad (28)$$

式中: α ——短路时的相位角。

由暂态电流的构成及式(28)分析可知, i_{pa1} 为电流的稳态分量, i_{pa2} 为电流的暂态直流分量, i_{pa3} 为电流的转子频率分量。

当未发生短路故障时,三相电流中仅存在稳态分量;当BDFG在 t_0 时刻短路,电压完全跌落, $p=1$ 、 $U''_{ck0+}=0$ 时,三相电流中稳态分量消失,暂态直流分量与转子频率分量出现。功率绕组短路电流表达式为

$$i_{pa} = \frac{1}{L'_{sp}} \left\{ \frac{U_{pk0-}}{j\omega_p} \cos\alpha e^{-t/\tau_p} + K_{pc} \frac{U''_{ck0-}}{j\omega_p} \cos\alpha e^{-t/\tau_c} - K_{pr} \left[\frac{(U''_{ck0-} - Z''_c I''_{ck0}) L'_r}{j\omega_p L''_{cr}} + \frac{(U_{pk0-} - Z_p I_{pk0}) L'_r}{j\omega_p L'_{pr}} \right] \cos(\omega_p t + \alpha) e^{-t/\tau_r} \right\} \quad (29)$$

同理,可得控制绕组及转子绕组在短路瞬间的A相电流表达式。结合式(11)、式(23)~式(25)可得控制绕组的暂态电流表达式为

$$i_{ca} = \frac{1}{L'_{sc}} \left\{ K_{cp} \frac{U_{pk0-}}{j\omega_p} \cos\alpha e^{-t/\tau_p} + \frac{U''_{ck0-}}{j\omega_p} \cos\alpha e^{-t/\tau_c} - K_{cr} \left[\frac{(U''_{ck0-} - Z''_c I''_{ck0}) L'_r}{j\omega_p L''_{cr}} + \frac{(U_{pk0-} - Z_p I_{pk0}) L'_r}{j\omega_p L'_{pr}} \right] \cos(\omega_p t + \alpha) e^{-t/\tau_r} \right\} \quad (30)$$

结合式(12)、式(23)~式(25),可得转子绕组暂态电流表达式为

$$i_{ra} = \frac{1}{L'_r} \left\{ K_p \frac{U_{pk0-}}{j\omega_p} \cos\alpha e^{-t/\tau_p} + K_c \frac{U''_{ck0-}}{j\omega_p} \cos\alpha e^{-t/\tau_c} - \left[\frac{(U''_{ck0-} - Z''_c I''_{ck0}) L'_r}{j\omega_p L''_{cr}} + \frac{(U_{pk0-} - Z_p I_{pk0}) L'_r}{j\omega_p L'_{pr}} \right] \cos(\omega_p t + \alpha) e^{-t/\tau_r} \right\} \quad (31)$$

由式(27)~式(31)可知, i_{pa} 、 i_{ca} 、 i_{ra} 均存在最大值,分析可得,当 $\alpha = k_1 \pi$ ($k_1 = 2n, n \in N$),取 $k_1 = 0$ 时,则 $\cos\alpha = 1$;当 $\cos(\omega_p t + 0) = -1$,有 $\omega_p = k_2 \pi$ ($k_2 = 2n + 1, n \in N$),取 $k_2 = 1$ 时,则 $t = \frac{\pi}{\omega_p} = \frac{T}{2}$ 。此时,各绕组短路电流最大。

2 加入保护电路后的三相短路电流

2.1 适用于BDFG系统的保护电路

在BDFG功率绕组短路瞬间,外部汇流排处断路器检测到过电流后立即分离,将轴带系统与负载隔离,以保证负载安全,同时因电机内部PW

短路,过电流将基本不再流经网侧变流器。短路后过电流将流向 BDFG,经电机内部电磁关系影响定子 PW、转子 PW、转子 CW、定子 CW 的电磁量变化,最终过电流经电机控制绕组流经 CW 侧变流器。CW 侧变流器将遭到过电流冲击,电量将积累于直流母线侧,同时网侧变流器因输出电路被切断,直流母线侧能量积累加剧。因此,当功率绕组短路故障发生时,在系统中对 BDFG 和 CW 侧变流器造成的损伤最大。

分析式(29)~式(31)可知,过电流主要由功率绕组和控制绕组暂态直流量,以及在 2 套定子绕组的电磁感应下转子绕组上产生的一对转子频率分量组成。

综合短路过程及过电流起因来设计保护电路。可考虑在 CW 侧变流器处增加撬棒保护电路,使三相交流开关快速检测过电流,与旁路电阻 R_{cb} 组成消耗电路,在过电流衰减后,还可自行关断。在直流母线侧增加卸载负荷以消耗过剩能量。具体的保护电路如图 4 所示。

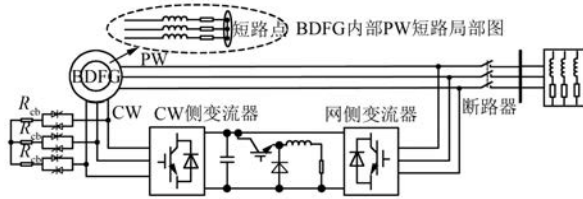


图 4 适用于船舶轴带 BDFG 发电系统的保护电路

加入保护电路后,撬棒保护电路动作,将过电流分流后,使旁路电阻消耗部分过电流,小部分能量流入 CW 侧变流器,在直流母线处运用卸载电荷将直流母线侧积累的过剩能量消耗。

2.2 含保护电路的短路电流计算

因为在上述计算中并未计入保护电路,所以需要重新建立含旁路电阻的暂态新模型。在新模型中,当短路时,保护电路接通,旁路电阻 R_{cb} 接入后,CW 侧总的等效电阻为 $R''_c + R''_{cb}$,此时电机控制绕组新的暂态时间常数和等效阻抗分别为

$$\tau_{2c} = \frac{L'_{sc}}{R''_c + R''_{cb}} \quad (32)$$

$$Z''_{2c} = R''_{sc} + j\omega_k L'_{sc} \quad (33)$$

加入保护电路后,定子 CW 磁链为

$$\psi_{2ck0+} = \frac{U''_{2ck0+}}{j\omega_k} e^{j\omega_k t} + \frac{U''_{ck0-} - U''_{2ck0+}}{j\omega_k} e^{-t/\tau_{2c}} \quad (34)$$

此时转子磁链中,与定子 PW 相耦合的转子 PW 磁链将不发生改变,因 R_{cb} 的接入,与定子 CW 耦合的转子 CW 磁链将减小。具体表达式为

$$\psi_{2rk0+} = \left\{ \frac{[U''_{ck0-} - (R''_{sc} + j\omega_k L'_{sc}) I''_{ck0}] L'_r}{j\omega_k L''_{cr}} + \frac{(U_{pk0-} - Z_p I_{pk0}) L'_r}{j\omega_k L'_{pr}} \right\} e^{j\omega_k t} e^{-t/\tau_r} \quad (35)$$

电压依旧为完全跌落,式(32)~式(35)变化,式(26)~式(31)也随之改变。式(28)改变为

$$i_{2pa} = \frac{1}{L'_{sp}} (i_{2pa1} + i_{2pa2} + i_{2pa3}) \quad (36)$$

i_{2pa1} 、 i_{2pa2} 、 i_{2pa3} 为

$$\left\{ \begin{aligned} i_{2pa1} &= \frac{(1-p) U_{pk0-}}{j\omega_k} \cos(\omega_k t + \alpha') + K_{pc} \left[\frac{U''_{2ck0+}}{j\omega_k} \cos(\omega_k t + \alpha') \right] \\ i_{2pa2} &= \frac{p U_{pk0-}}{j\omega_k} \cos \alpha' e^{-t/\tau_p} + K_{pc} \frac{U''_{ck0-} - U''_{2ck0+}}{j\omega_k} \cos \alpha' e^{-t/\tau_{2c}} \\ i_{2pa3} &= -K_{pr} \left\{ \frac{[U''_{ck0-} - (R''_{sc} + j\omega_k L'_{sc}) I''_{ck0}] L'_r}{j\omega_k L''_{cr}} + \frac{(U_{pk0-} - Z_p I_{pk0}) L'_r}{j\omega_k L'_{pr}} \right\} e^{j\omega_k t} e^{-t/\tau_r} \end{aligned} \right. \quad (37)$$

式中: α' ——加入保护电路后短路时的相位角;

i_{2pa1} 、 i_{2pa2} 、 i_{2pa3} ——加入保护电路后电流的稳态、暂态直流、暂态交流分量。

从式(37)可知,与未加入保护电路时相比,稳态分量 i_{2pa1} 基本无变化;暂态直流分量中第一项无变化,但第二项的暂态衰减时间常数变为 τ_{2c} ;转子频率分量中 Z''_{2c} 增加使第一项减小,进而使得 i_{2pa3} 减小。

任意坐标系仍以功率绕组同步坐标系旋转,即 $\omega_k = \omega_p$ 。当 BDFG 在 t_0 时刻短路,PW 电压完全跌落, $p=1$ 、 $U''_{2ck0+}=0$ 时, i_{2pa} 为

$$i_{2pa} = \frac{1}{L'_{sp}} \left\{ \frac{U_{pk0-}}{j\omega_p} \cos \alpha' e^{-t/\tau_p} + K_{pc} \frac{U''_{ck0-}}{j\omega_p} \cos \alpha' e^{-t/\tau_{2c}} - K_{pr} \left\{ \frac{[U''_{ck0-} - (R''_{sc} + j\omega_k L'_{sc}) I''_{ck0}] L'_r}{j\omega_p L''_{cr}} + \right. \right.$$

$$\left. \frac{(U_{pk0} - Z_p I_{pk0}) L'_r}{j\omega_p L'_{pr}} \right\} \cos(\omega_p t + \alpha') e^{-t/\tau_r} \quad (38)$$

将式(23)、式(34)、式(35)代入式(11),可得控制绕组在加入保护电路后的暂态电流表达式为

$$i_{2ca} = \frac{1}{L'_r} \left\{ K_{cp} \frac{U_{pk0}}{j\omega_p} \cos\alpha' e^{-t/\tau_p} + \frac{U''_{ck0}}{j\omega_p} \cos\alpha' e^{-t/\tau_{2c}} - K_{cr} \left\{ \frac{[U''_{ck0} - (R''_{sc} + j\omega_k L'_{sc}) I''_{ck0}] L'_r}{j\omega_p L'_{cr}} + \frac{(U_{pk0} - Z_p I_{pk0}) L'_r}{j\omega_p L'_{pr}} \right\} \cos(\omega_p t + \alpha') e^{-t/\tau_r} \right\} \quad (39)$$

将式(23)、式(34)、式(35)代入式(12),可得转子在加入保护电路后的电流为

$$i_{2ra} = \frac{1}{L'_r} \left\{ K_p \frac{U_{pk0}}{j\omega_p} \cos\alpha' e^{-t/\tau_p} + K_c \frac{U''_{ck0}}{j\omega_p} \cos\alpha' e^{-t/\tau_{2c}} - \left\{ \frac{[U''_{ck0} - (R''_{sc} + j\omega_k L'_{sc}) I''_{ck0}] L'_r}{j\omega_p L'_{cr}} + \frac{(U_{pk0} - Z_p I_{pk0}) L'_r}{j\omega_p L'_{pr}} \right\} \cos(\omega_p t + \alpha') e^{-t/\tau_r} \right\} \quad (40)$$

当各绕组过电流取最大值时,有 $\cos\alpha' = 1$, $\alpha' = k_3 \pi (k_3 = 2n, n \in N)$, 取 $k_3 = 0$; $\cos(\omega_p t + 0) = -1$, 有 $t = \pi/\omega_p = T/2$, 此时各绕组电流将达到最大值。

对比式(29)~式(31)与式(38)~式(40)可知,当船舶轴带 BDFG 功率绕组短路时,撬棒保护电路中旁路电阻 R_{cb} 的接入,将导致电机控制绕组暂态磁链衰减时间加快,短路电流的衰减也随之加快;同时将直接减小转子控制绕组磁链引起的电流量。

3 仿真分析

上文分别分析了 BDFG 功率绕组在无短路保护和加入保护电路后的在暂态电流,本节将在 MATLAB/Simulink 平台对 BDFG 的短路工况进行仿真,并与式(29)~式(31)和式(38)~式(40)的理论计算值进行比较。本文采用 1 台 30 kVA BDFG 进行仿真,参数如表 1 所示,转速设置为 600 r/min,由于电机漏电感远小于激磁电感,可

忽略不计。

表 1 BDFG 参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
U_p/V	380	I_p/A	92
U_c/V	0~320	I_c/A	0~150
p_p, p_c	2, 4	L_p/mH	225.36
L_c/mH	23.29	L_{pr}/mH	35.91
L_{cr}/mH	9.28	R_p/Ω	0.5
R_c/Ω	0.3	R_r/Ω	0.14

3.1 未加入保护电路时仿真

当 BDFG 功率绕组三相短路,且未加入保护电路时,各绕组短路电流仿真结果与式(29)~式(31)理论计算结果如图 5 所示,其中计算值与仿真均以标么值表示。

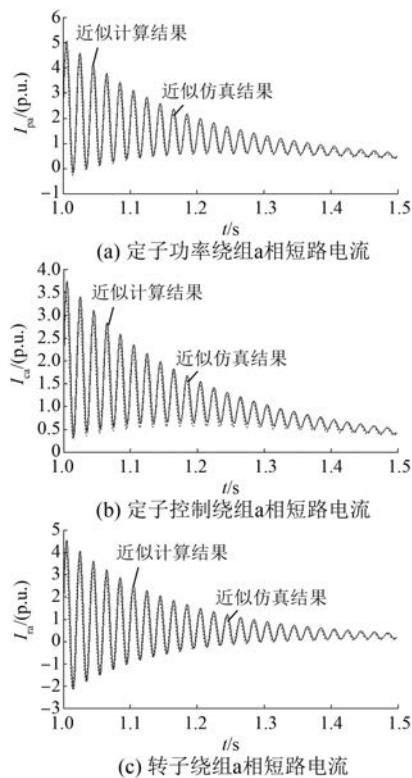


图 5 BDFG 暂态电流计算与仿真结果对比图

由图 5 可知,各绕组短路电流的仿真值与计算值均在第一个周期内达到最大值,具体值如表 2 所示。

由表 2 可知:(1)观察各绕组的短路电流峰值,无论计算值还是仿真值,均随功率绕组、转子绕组、控制绕组依次减小。原因是当 BDFG 功率

表 2 未加入保护电路时计算值与仿真值 p.u.

绕组 类型	计算值	仿真值	短路 0.1 s 后	短路 0.2 s 后
	最大峰值	最大峰值	仿真峰值	仿真峰值
功率绕组	5.19	4.81	2.87	1.97
控制绕组	3.84	3.48	2.21	1.59
转子绕组	4.71	4.36	2.35	1.37

绕组短路后,在 BDFG 内产生的过电流,经电机内部电磁传递依次影响定子功率绕组、转子功率绕组、转子控制绕组、定子控制绕组的电磁量,进而产生以上仿真与计算结果,与上述理论分析相吻合。(2)对于各绕组短路电流峰值,计算值要基本大于仿真值。原因是在模型仿真中,模型中控制策略的存在对短路电流具有一定的抑制作用,误差约在 7.5%,证明了理论计算的正确性。(3)因为 BDFG 比其他感应电机多出一套定子绕组,所以瞬间短路值与 0.2 s 后的短路峰值比其他感应电机小。但短路瞬间峰值仍可达约 4.5 p.u.,且 0.1 s 时电流值仍较大,因此有必要研究短路时的保护电路设计。

3.2 加入保护电路后仿真结果

设定仿真时保护电路中撬棒电阻实际值为 10 Ω。加入保护电路后,各绕组短路电流的仿真与计算结果如图 6 所示。

依据图 6 中加入保护电路后各绕组过电流仿真值,主要节点数值如表 3 所示。

表 3 加入保护电路时计算值与仿真值 p.u.

绕组 类型	不含保护电 路时仿真值	加入保护电 路后计算值	加入保护电 路后仿真值	短路 0.1 s 时 仿真峰值
	最大峰值	最大峰值	最大峰值	
功率绕组	4.81	3.62	3.44	1.82
控制绕组	3.48	2.34	2.12	0.76
转子绕组	4.36	2.75	2.48	1.13

由表 3 具体数据可知:(1)加入保护电路后,计算值与仿真值平均相差 8%,说明了理论推导的正确性。同样验证了控制策略对过电流的抑制作用。(2)与未加入保护电路时的仿真值相比,加入保护电路后过电流幅值明显减小。原因是撬棒电阻的加入,有效降低了暂态交流分量的结果。(3)对比加入保护电路前后 0.1 s 时的仿真峰值可知,加入保护电流后过电流的衰减速度更快。

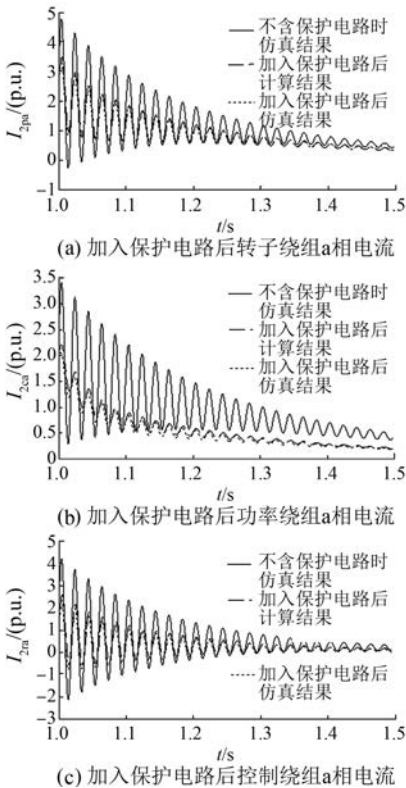


图 6 加入保护电路后各绕组短路电流对比图

原因是撬棒电阻的加入引起了控制绕组侧暂态常数减小的结果。

4 结 语

本文以船舶轴带 BDFG 发电系统动态数学模型为基础,通过建立暂态等效电路分析功率绕组三相短路时的暂态过程,以短路时的电磁守恒定律为依据,推导了短路前后磁链表达式,进而得到短路后的暂态电流表达式。通过对暂态电流的分析提出在控制绕组侧增设含旁路电阻的撬棒保护电路以及在直流母线侧加入卸载电路的方式来保护系统。并与加入保护电路前后的仿真进行比较,得出旁路电阻的引入使各绕组暂态电流幅值降低、衰减加快,从而对短路电流具有一定的抑制效果。

【参考文献】

[1] 贾磊,王雪帆,熊飞.700 kW 船用轴带无刷双馈发电机的设计与测试[J].电工技术学报,2016,31(15): 32.
[2] PREINDL M, BOLOGNANI S. Model predictive

- direct torque control with finite control set for PMSM drive systems, part 2: field weakening operation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9 (2): 648.
- [3] CHEN X, WANG X. A novel wound rotor BDFIG for ship shaft generator application-control and prototype tests[C] // 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014.
- [4] 王晓梅, 孙健, 常国梅, 等. 一种新的无刷双馈电机轴带系统矢量控制方案[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(3): 11.
- [5] 周生海, 王思征, 柏峰, 等. 一种改进的船舶电力系统短路电流计算方法研究[J]. 电工技术, 2018 (10): 69.
- [6] 胡兰青, 孙丽玲. 定子匝间短路故障下双馈风力发电机组高压穿越性能研究[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(5): 108.
- [7] 叶瑞丽, 刘瑞叶, 刘建楠, 等. 直驱风电机组风电场接入后的电力系统暂态稳定计算[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 211.
- [8] 向大为, 万安国. 机端三相短路故障时双馈感应发电机暂态分析[J]. 电机技术, 2011(4): 17.
- [9] 欧阳金鑫, 熊小伏, 张涵轶. 电网短路时并网双馈风电机组的特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 17.
- [10] LOPEZ J, SANCHIS P, ROBOAM X, et al. Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22 (3): 709.
- [11] 吴伟亮, 封阿明, 简优宗. 一种风电变流器 Chopper 装置的测试方法[J]. 电气技术, 2018, 19(8): 59.
- [12] 徐岩, 卜凡坤, 杨超楠. 双馈感应风力发电机在三相短路故障下暂态电流特性分析[J]. 电机与控制应用, 2013, 40(2): 51.
- [13] 潘文霞, 杨刚, 刘明洋, 等. 考虑 Crowbar 电阻的双馈电机短路电流计算[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3629.
- [14] 邹志策, 雷一, 欧然, 等. 改善双馈感应发电机无功特性的变阻值撬棒保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 87.
- [15] 李辉, 叶仁杰, 高强, 等. 传动链模型参数对双馈风电机组暂态性能影响[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(3): 24.
- [16] 刘光军. 绕线转子无刷双馈电机电磁分析和瞬态模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [17] 李菁, 郑涛, 赵裕童, 等. 双馈风电短路电流特性对距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 37.
- [18] SULLA F, SVENSSON J, SAMUELSSON O. Short-circuit analysis of a doubly fed induction generator wind turbine with direct current chopper protection[J]. Wind Energy, 2013, 16(1): 37.

收稿日期: 2019-04-15

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发行人,邮发

代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。