

计及撬棒保护的双馈风电机组不对称短路电流特性分析

郑涛¹, 魏占朋¹, 李娟¹, 王皓靖²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京 102206; 2. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045)

摘要: 电网故障时, 双馈式感应风电机组 (DFIG) 在机端电压深度跌落过程中表现出的电磁暂态特性十分复杂。计及撬棒保护的 DFIG 不对称短路特性研究较少, 为了准确描述机端电压深度跌落过程中 DFIG 不对称短路电流变化特性, 基于空间矢量和序分量法, 建立了双馈感应电机的正、负序数学模型。在考虑双馈风电机组不同初始运行功率的情况下, 通过数学解析的方法推导了撬棒保护电路投入后定子正、负序磁链的计算表达式, 在此基础上得到了定、转子电流的解析表达式。该方法同样适用于对称性故障时 DFIG 短路电流的解析计算。最后, 通过 Matlab/Simulink 仿真软件验证了双馈风电机组机端发生对称和不对称电压跌落时定子电流解析计算表达式的准确性。

关键词: 双馈风电机组; 不对称故障; 撬棒保护; 短路电流特性; 故障分析

Unsymmetrical short circuit current analysis of doubly fed induction generators with crowbar protection

ZHENG Tao¹, WEI Zhan-peng¹, LI Juan¹, WANG Hao-jing²

(1. State Key Laboratory of New Energy Power System, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. North China Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China)

Abstract: Electromagnetic transient characteristics of doubly fed induction generator (DFIG) are very complex during the terminal voltage severely dips. One issue that has not received much attention so far is the contribution of DFIG to the asymmetrical short-circuit fault. In order to describe the DFIG's asymmetrical short-circuit current characteristics accurately, positive and negative sequence vector model of DFIG are established based on space vector theory and sequence component method. Considering the different initial operating power of DFIG, the accurate mathematical expressions of the stator and rotor flux after crowbar insertion is deduced through mathematical analysis. After that, then the accurate expressions of the stator and rotor short circuit current are derived. The method is also suitable for the calculation of DFIG short circuit when symmetrical fault occurs. Finally, the mathematical expressions of stator current are verified according to the standard DFIG model in MATLAB/SIMULINK under the cases of symmetrical and asymmetrical voltage dips respectively.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050208).

Key words: doubly fed induction generators (DFIG); unsymmetrical fault; crowbar protection; short-circuit current characteristics; fault analysis

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0007-06

0 引言

随着电力系统中的风电机组装机容量的迅速增加, 掌握电网故障时并网风电机组的故障特性及故障分析方法具有十分重要的意义^[1]。本文重点研究了基于双馈感应电机的双馈风电机组并入电网时的暂态特性。双馈风电机组具有利用率高、逆变器容量小、功率可解耦控制等优点。当电网故障时, 机端电压跌落会导致双馈风电机组定转子侧磁链的

大幅变化, 进而引起定转子回路出现过电流和过电压等复杂的暂态过程^[2-5], 造成发电机和转子侧变流器损坏。此时应立即投入撬棒保护, 闭锁转子侧变流器, 以减小系统的短路电流, 保障双馈风电机组实现低压穿越。

文献[6]通过类比普通异步电机的方法推导了带有撬棒保护的双馈风电机组在空载运行情况下发生短路故障时短路电流解析表达式。文献[7]指出双馈机组提供的短路电流与传统同步机组提供的短路电流具有明显的差异。文献[8]研究了在三相短路期间 DFIG 接入撬棒保护后的电磁暂态特性, 并且推导出了额定运行工况下的定转子短路电流近似表达

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2012AA050208)

式。文献[9]采用数学解析的方法,推导了DFIG机端发生三相对称性短路故障时短路电流的最大值并分析了出现最大值的短路时刻。文献[10]则采用空间矢量方法推导了带有撬棒保护的DFIG和普通异步电机在发生对称故障时的短路电流的解析表达式,并分析了撬棒电阻的数值对短路电流的影响。文献[11-12]分析了机端对称故障和不对称故障情况下,DFIG定转子磁链的解析表达式,但是对于转子侧磁链的分析做了较多的简化。

以上文献对空载或接近同步转速情况下的双馈风电机组机端发生对称性短路时的暂态过程进行了相关分析,对于在机端发生不对称故障时短路暂态过程的研究较少,并且在分析转子磁链时都做了较多的简化。本文提出了一种可以考虑DFIG不同初始运行功率情况下机端发生不对称故障时定转子侧短路电流表达式的计算方法,即基于空间矢量理论和序分量理论建立DFIG正、负序数学模型^[13-14],在分析DFIG稳态运行初始值情况下,通过求解定转子正、负序电压方程给出不对称短路时定转子正、负序短路电流精准计算式。所得解析表达式能够清晰深刻地反应双馈风电机组短路电流的故障特性及变化过程。

1 双馈感应电机的正负序数学模型

本文采用双馈感应电机的空间矢量模型,定、转子侧均采用电动机惯例^[15],忽略磁饱和现象。

由空间矢量的定义可知,电力系统中电压空间矢量的表示形式为

$$U_s(t) = \frac{2}{3} (u_A(t) + au_B(t) + a^2 u_C(t)) = \hat{U} e^{j\varphi} e^{j\omega t} = U e^{j\omega t} \quad (1)$$

式中: $a = e^{j2\pi/3}$, $a^2 = e^{-j2\pi/3}$; $u_A(t)$ 、 $u_B(t)$ 、 $u_C(t)$ 分别为系统三相电压瞬时值; \hat{U} 为电压的幅值; φ 为 A 相电压的初相角,且保持恒定; U 为 A 相电压的相量表示。

双馈风电机组一般采用中性点不接地的星形接法,不存在零序分量,因此在利用空间矢量模型进行不对称故障分析时,可将定转子电压、电流和磁链的空间矢量分解为正、反向旋转的同步旋转坐标系中对应的正、负序矢量。例如,不对称电压的空间矢量可表示为

$$U_s = U^P + U^N = U_+^P e^{j\omega t} + U_-^N e^{-j\omega t} \quad (2)$$

式中:“+”和“-”分别代表正向和反向同步旋转坐标系;上标 P 和 N 分别代表正序和负序分量。该

式同样也可应用于电流和磁链的空间矢量。

因此,可建立双馈感应电机的正、负序矢量模型,如式(3)和式(4)所示,分别为正向和反向同步旋转坐标系下正序和负序数学模型^[16-17]。文中如无特殊说明,正向同步旋转坐标系下的正序矢量简述为“正序分量”,反向同步旋转坐标系下的负序矢量简述为“负序分量”。

$$\begin{cases} U_{s,+}^P = R_s I_{s,+}^P + D\psi_{s,+}^P + j\omega_1 \psi_{s,+}^P \\ U_{r,+}^P = R_r I_{r,+}^P + D\psi_{r,+}^P + j\omega_s \psi_{r,+}^P \\ \psi_{s,+}^P = L_s I_{s,+}^P + L_m I_{r,+}^P \\ \psi_{r,+}^P = L_m I_{s,+}^P + L_r I_{r,+}^P \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} U_{s,-}^N = R_s I_{s,-}^N + D\psi_{s,-}^N - j\omega_1 \psi_{s,-}^N \\ U_{r,-}^N = R_r I_{r,-}^N + D\psi_{r,-}^N - j(2-s)\omega_1 \psi_{r,-}^N \\ \psi_{s,-}^N = L_s I_{s,-}^N + L_m I_{r,-}^N \\ \psi_{r,-}^N = L_m I_{s,-}^N + L_r I_{r,-}^N \end{cases} \quad (4)$$

式中: $U_{s,+}^P$ 、 $I_{s,+}^P$ 、 $\psi_{s,+}^P$ 、 $U_{r,+}^P$ 、 $I_{r,+}^P$ 、 $\psi_{r,+}^P$ 分别代表定、转子侧正序电压、电流、磁链的空间矢量; $U_{s,-}^N$ 、 $I_{s,-}^N$ 、 $\psi_{s,-}^N$ 、 $U_{r,-}^N$ 、 $I_{r,-}^N$ 、 $\psi_{r,-}^N$ 分别代表定转子侧负序电压、电流、磁链的空间矢量; R_s 、 R_r 分别为定转子侧的绕组; L_s 、 L_r 、 L_m 分别为定转子侧的自感和互感; ω_1 为同步旋转角速度; ω_r 为转子角速度; ω_s 为转差角速度; s 为转差频率。

2 计及撬棒保护的不对称短路电流分析

当双馈风电机组机端电压跌落严重时,撬棒保护电路动作,抑制短路电流保护变频器不受损坏。假设 $t=0$ 时刻系统发生短路故障,双馈感应电机的机端电压深度跌落,此时撬棒保护立即投入,并将转子侧变频器闭锁,双馈式风电机组作异步运行,转子侧励磁电压变为零。

电力系统不对称故障的分析和计算,一般通过序分量法,将不对称的电气量分解为对称的正、负和零序对称量^[18]。由于双馈风电机组中不存在零序分量,因此在发生不对称故障时,短路电流只包含正序电流分量和负序电流分量。

根据双馈感应电机的矢量模型,可得

$$\begin{cases} I_s = \frac{L_r}{M} \psi_s - \frac{L_m}{M} \psi_r \\ I_r = -\frac{L_m}{M} \psi_s + \frac{L_s}{M} \psi_r = A\psi_s + B\psi_r \end{cases} \quad (5)$$

式中: $M = L_s L_r - L_m^2$; $A = -L_m / M$; $B = L_s / M$ 。

式(5)既适用于正序矢量模型, 也适用于负序矢量模型。通过求解定、转子磁链解析表达式, 即可求得整个故障过程短路电流的解析表达式。

设故障后的机端电压为 U_s' , 可以分解为正、负序分量如式(6)所示。

$$U_s' = U_{s,+}^P e^{j\omega_1 t} + U_{s,-}^N e^{-j\omega_1 t} \quad (6)$$

式中, $U_{s,+}^P$ 和 $U_{s,-}^N$ 为故障后机端正负序电压值。

2.1 正序故障电流解析

根据双馈风电机组故障前稳态运行状态, 可得 $t=0$ 时刻定子电流和磁链初始值如式(7)所示。

$$\begin{cases} I_s(0) = -(S / (3U_s))^{*} \\ \psi_s(0) = U_s / (j\omega_1) \end{cases} \quad (7)$$

式中: I_s 为稳态运行时定子电流矢量; ψ_s 为稳态运行时定子磁链矢量; U_s 为稳定运行时机端电压矢量; S 为风电机组输出的视在功率; “*” 为取共轭运算。

故障发生前, 电力系统稳定对称运行, 不存在负序分量。根据式(3)、式(4)可得, $t=0$ 时刻所需正序电气量初始值如式(8)所示。

$$\begin{cases} I_{s,+}^P(0) = I_s(0) \\ \psi_{s,+}^P(0) = \psi_s(0) \\ \psi_{r,+}^P(0) = \frac{L_r}{L_m} \psi_{s,+}^P(0) - \frac{M}{L_m} I_{s,+}^P(0) \end{cases} \quad (8)$$

忽略定子电阻, 由式(3)中定子正序电压方程可得

$$U_{s,+}^P = D\psi_{s,+}^P + j\omega_1 \psi_{s,+}^P \quad (9)$$

解式(9), 考虑定子衰减时间常数的影响, 并根据式(8)中定子正序磁链初始值, 可得定子正序磁链的表达式如式(10)所示。

$$\psi_{s,+}^P = \frac{U_{s,+}^P}{j\omega_1} + \left(\frac{U_s}{j\omega_1} - \frac{U_{s,+}^P}{j\omega_1} \right) e^{-j\omega_1 t} e^{-t/T_s} \quad (10)$$

式中, $T_s = M / L_r R_s$, 为定子衰减时间常数^[8]。

根据式(5)可知, 转子正序电流与定转子正、负序磁链的关系如式(11)所示。

$$I_{r,+}^P = -\frac{L_m}{M} \psi_{s,+}^P + \frac{L_s}{M} \psi_{r,+}^P = A\psi_{s,+}^P + B\psi_{r,+}^P \quad (11)$$

将式(11)代入式(3)中的转子正序电压方程, 根据撬棒保护投入后, 转子侧励磁电压变为零和转子侧电阻变为 R_t , 可得转子正序磁链的微分方程为

$$D\psi_{r,+}^P + (j\omega_s + BR_t) \psi_{r,+}^P = -AR_t \psi_{s,+}^P \quad (12)$$

式中, R_t 为转子绕组和撬棒电阻之和, 表达式为

$$R_t = R_r + R_c。$$

解上式, 根据式(8)定、转子正序磁链初始值和式(10)定子磁链表达式, 可得转子正序磁链表达式如式(13)所示。

$$\psi_{r,+}^P = -\frac{AR_t U_{s,+}^P}{j\omega_1(j\omega_s + 1/T_r)} - \frac{AR_t(U_s - U_{s,+}^P)}{j\omega_1(1/T_r - j\omega_r - 1/T_s)} e^{-j\omega_1 t} e^{-t/T_s} + C_1 e^{-j\omega_1 t} e^{-t/T_{r1}} \quad (13)$$

其中: $T_{r1} = M / L_s R_t$, 为转子衰减时间常数; C_1 为积分常数, 其值如式(14)所示。

$$C_1 = \psi_{r,+}^{P,1}(0) - \frac{U_{r,+}^{P,1}(0)}{j\omega_s + \frac{1}{T_{r1}}} + \frac{AR_t U_{s,+}^{P,1}}{j\omega_1(j\omega_s + \frac{1}{T_{r1}})} + \frac{AR_t(U_s - U_{s,+}^{P,1})}{j\omega_1(-j\omega_r + \frac{1}{T_{r1}} - \frac{1}{T_s})} \quad (14)$$

根据式(11)和式(13), 得定、转子正序电流的表达式为

$$\begin{cases} I_{s,+}^P = \frac{L_r}{M} \psi_{s,+}^P - \frac{L_m}{M} \psi_{r,+}^P \\ I_{r,+}^P = -\frac{L_m}{M} \psi_{s,+}^P + \frac{L_s}{M} \psi_{r,+}^P \end{cases} \quad (15)$$

2.2 负序故障电流解析

$t=0$ 时刻所需负序电气量初值如式(16)所示。

$$\begin{cases} \psi_{s,-}^N(0) = 0 \\ \psi_{r,-}^N(0) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

同理, 忽略定子电阻, 由式(4)中定子负序电压方程可得

$$U_{s,-}^N = D\psi_{s,-}^N - j\omega_1 \psi_{s,-}^N \quad (17)$$

解式(17), 考虑定子衰减时间常数的影响, 并根据式(16)中定子负序磁链初始值, 可得定子负序磁链的解析表达式如式(18)所示。

$$\psi_{s,-}^N = -\frac{U_{s,-}^N}{j\omega_1} + \frac{U_{s,-}^N}{j\omega_1} e^{j\omega_1 t} e^{-t/T_s} \quad (18)$$

根据式(4)可得, 转子负序电流与定、转子负序磁链的关系如式(19)所示。

$$I_{r,-}^N = -\frac{L_m}{M} \psi_{s,-}^N + \frac{L_s}{M} \psi_{r,-}^N = A\psi_{s,-}^N + B\psi_{r,-}^N \quad (19)$$

将式(19)代入式(4)中的转子负序电压方程中, 同理, 撬棒保护投入后, 转子侧励磁电压变为零和转子侧电阻变为 R_t , 可得转子负序磁链微分方程如式(20)所示。

$$D\psi_{r,-}^N + (BR_t - j(2-s)\omega_s) \psi_{r,-}^N = -AR_t \psi_{s,-}^N \quad (20)$$

解式(20), 根据式(16)转子负序磁链初始值和式

(18)定子负序磁链表达式, 可得转子负序磁链的解析表达式如式(21)所示。

$$\psi_{r,-}^N = \frac{AR_t U_{s,-}^N}{j\omega_1 \left(\frac{1}{T_{r1}} - j(2-s)\omega_1 \right)} e^{-j\omega_1 t} - \frac{AR_t U_{s,-}^N}{j\omega_1 \left(\frac{1}{T_{r1}} - \frac{1}{T_s} - j(1-s)\omega_1 \right)} e^{j\omega_1 t} e^{-t/T_s} + C_2 e^{j(2-s)\omega_1 t} e^{-t/T_{r1}} \quad (21)$$

其中: $T_{r1} = M / L_s R_t$, 为撬棒保护动作后转子衰减时间常数; C_2 为积分常数, 其值如式(22)所示。

$$C_2 = -\frac{AR_t U_{s,-}^{N,1}}{j\omega_1 \left(\frac{1}{T_{r1}} - j(2-s)\omega_1 \right)} + \frac{AR_t U_{s,-}^{N,1}}{j\omega_1 \left(\frac{1}{T_{r1}} - \frac{1}{T_s} - j(1-s)\omega_1 \right)} \quad (22)$$

根据式(18)和式(21), 定、转子负序电流的解析表达式如式(23)所示。

$$\begin{cases} I_{s,-}^N = \frac{L_r}{M} \psi_{s,-}^N - \frac{L_m}{M} \psi_{r,-}^N \\ I_{r,-}^N = -\frac{L_m}{M} \psi_{s,-}^N + \frac{L_s}{M} \psi_{r,-}^N \end{cases} \quad (23)$$

根据式(15)和式(23)求得的定转子正、负序电流解析式, 可得定转子短路电流的表达式如式(24)所示。

$$\begin{cases} I_{s,\alpha\beta} = I_{s,+}^P e^{j\omega_1 t} + I_{s,-}^N e^{-j\omega_1 t} \\ I_{r,\alpha\beta} = I_{r,+}^P e^{j\omega_1 t} + I_{r,-}^N e^{-j\omega_1 t} \end{cases} \quad (24)$$

由空间矢量的定义, 可以得定转子各相电流表达式为

$$\begin{cases} i_{s(r),a} = \text{Re}(I_{s(r),\alpha\beta}) \\ i_{s(r),b} = \text{Re}(a^2 I_{s(r),\alpha\beta}) \\ i_{s(r),c} = \text{Re}(a I_{s(r),\alpha\beta}) \end{cases} \quad (25)$$

3 仿真实验

参考 Matlab/Simulink 中 1.5 MW 双馈式风力发电机仿真模型, 搭建如图 1 所示的仿真系统。验证当系统侧发生短路故障(对称和不对称)引起机端电压严重跌落时, 撬棒保护投入后, 本文提出的短路电流解析计算表达式的有效性。

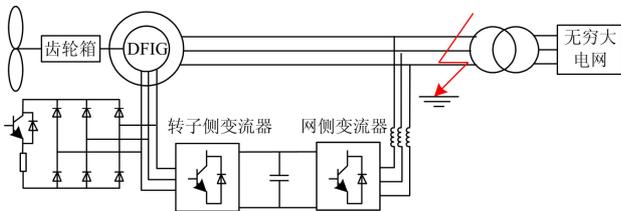


图 1 仿真系统

Fig. 1 Simulation system

故障前, 双馈风电机组超同步运行, 采用恒功

率控制, 输出有功功率 $P=0.9$ pu, 无功功率 $Q=0$ 。其中撬棒电阻阻值取 30 倍的转子绕组的阻值, 双馈风电机组的参数如表 1 所示。

表 1 双馈风电机组的参数

Table 1 Parameters of DFIG

参数	参考值
额定电压 U	575 V
额定功率 S	1.5 MW
系统频率 f	60 Hz
定子侧电阻 R_s	0.007 3 pu
转子侧电阻 R_r	0.005 2 pu
撬棒电阻 R_c	$30 \times R_r$
定转子互感 L_m	3 pu
定子自感 L_s	3.176 6 pu
转子自感 L_r	3.161 0 pu
转子转速 ω_r	1.15 pu

3.1 对称性故障仿真

设 $t=0$ ms 时, 双馈感应发电机机端电压跌落为零, 同时转子侧撬棒保护瞬时投入, 此时 A 相电压的初相角 $\alpha=90^\circ$ 。定子 ABC 三相短路电流的解析计算波形与仿真波形对比图如图 2 所示。

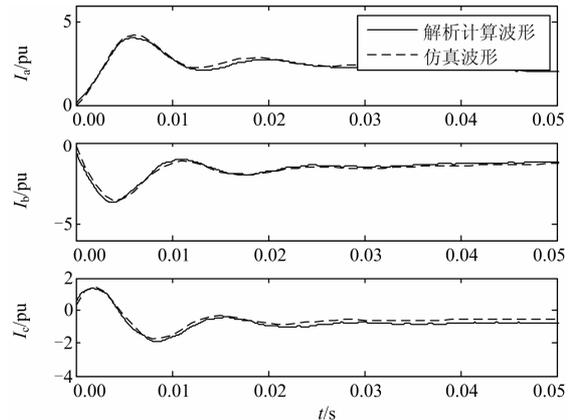


图 2 对称短路时, 定子侧短路电流解析计算波形与仿真波形对比图

Fig. 2 Simulated and calculated DFIG short-circuit current for a three-phase fault

由图 2 可以看出, 当机端发生三相对称性短路撬棒保护动作后, 交流分量在两个周波左右衰减结束, 只剩下衰减的直流分量。本文给出的定子 ABC 三相短路电流的解析计算波形精准地复现定子三相短路电流的仿真波形, 进而验证了所得解析表达式的有效性。由于理论分析中假设转子转速不变, 而在故障发生后, 随着短路时间的增加, 转子的转速略微有些变化, 所以后期存在较小的误差是允许的。

3.2 不对称性故障仿真

设 $t = 0$ ms 时, 双馈风电机组机端发生 BC 两相相间短路, 此时 A 相电压幅值不变, 初相角 $\alpha = 0^\circ$, BC 相电压与 A 相相反, 幅值为 A 相电压幅值的一半。DFIG 定子 ABC 三相的短路电流的解析计算波形与仿真波形对比图如图 3 所示。

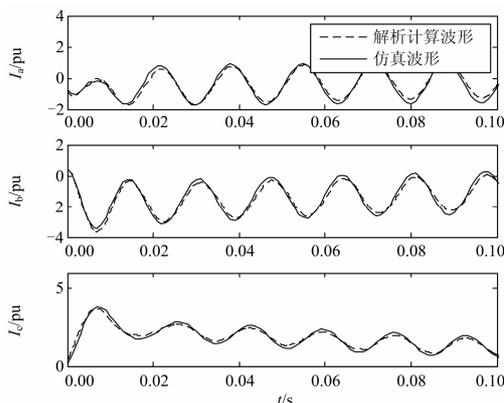


图 3 BC 相间短路时, 定子侧短路电流解析计算波形与仿真波形对比图

Fig. 3 Simulated and calculated DFIG short-circuit current for a phase-phase (b and c) fault

由图 3 可以看出, 当机端发生不对称故障时, 故障相 BC 相的短路电流幅值比较大, 非故障相 A 相短路电流幅值较小, 且交流转速频率分量在一个周波左右就衰减完, 剩下衰减的直流分量和稳定的交流工频分量。本文给出的 DFIG 定子不对称短路电流的解析计算波形同样精准地反映了仿真波形的变化趋势, 验证了所得解析表达式对不同故障情况的适用性。

4 结语

本文分析了并网双馈风电机组在不同初始运行状态下发生不对称短路期间投入撬棒保护后的暂态故障过程, 提出了一种通过求解正负序磁链微分方程来分析双馈风电机组不对称短路电流特性的方法。通过空间矢量理论, 建立了双馈感应电机的正、负序空间矢量模型, 结合序分量法给出了双馈风电机组短路电流的解析计算表达式, 该表达式既适用于对称故障情况, 又适用于不对称故障情况。通过解析计算式还可以求解短路电流的最大值, 交流成分和直流成分的幅值。本文提出的分析方法完善了双馈风电机组故障特性理论体系, 为涉及风电并网的继电保护整定提供了理论依据。

参考文献

[1] 焦在强. 大规模风电接入的继电保护问题综述[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 195-201.

- JIAO Zai-qiang. A survey on relay protection for grid-connection of large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 195-201.
- [2] Rahimi M, Parniani M. Grid-fault ride-through analysis and control of wind turbines with doubly fed induction generators[J]. Electric Power Systems Research, 2010(8): 184-195.
- [3] 杨之俊, 吴红斌, 丁明, 等. 故障时双馈风力发电系统的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 14-18.
- YANG Zhi-jun, WU Hong-bin, DING Ming, et al. Control strategy of doubly-fed wind generation system for power grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 14-18.
- [4] 王勇, 张纯江, 柴秀慧, 等. 电网电压跌落情况下双馈风力发电机电磁过渡过程及控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 14-19.
- WANG Yong, ZHANG Chun-jiang, CHAI Xiu-hui, et al. Electromagnetic transient process and control strategy for doubly-fed wind power generator under grid voltage dip[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 14-19.
- [5] 张禄, 金新民, 战亮宇, 等. 电网电压对称跌落下的双馈感应风力发电机磁链有源衰减控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 191-197.
- ZHANG Lu, JIN Xin-min, ZHAN Liang-yu, et al. Flux active damping control of the doubly fed induction generator under grid voltage symmetrical dip[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 191-197.
- [6] Morren J, Sjoerd W H, de HAAN. Short circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 174-180.
- [7] 撒奥洋, 张哲, 尹项根, 等. 双馈风力发电系统故障特性及保护方案构建[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 233-239.
- HAN Ao-yang, ZHANG Zhe, YIN Xiang-gen, et al. Research on fault characteristic and grid connecting-point protection scheme for wind power generation with doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 233-239.
- [8] 翟佳俊, 张步涵, 谢光龙, 等. 基于撬棒保护的双馈风电机组三相对称短路电流特性[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 18-22.

- ZHAI Jia-jun, ZHANG Bu-han, XIE Guang-long, et al. Three-phase symmetrical short-circuit current characteristics analysis of wind turbine driven DFIG with crowbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 18-22.
- [9] 郭家虎, 张鲁华, 蔡旭. 双馈风力发电系统在电网三相短路故障下的响应与保护[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 40-48.
- GUO Jia-hu, ZHANG Lu-hua, CAI Xu. Response and protection of DFIG system under three-phase short circuit fault of grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 40-48.
- [10] Sullá F, Svensson J, Samuelsson O. Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators[J]. Electric Power Systems Research, 2011(81): 1610-1618.
- [11] 李辉, 赵猛, 叶仁杰, 等. 电网故障下双馈风电机组暂态电流评估及分析[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(8): 45-51.
- LI Hui, ZHAO Meng, YE Ren-jie, et al. Evaluation and analysis of transient current of a DFIG wind generation system under grid fault[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(8): 45-51.
- [12] 孟岩峰, 胡书举, 王玲玲, 等. 电网故障条件下双馈机组运行特性分析及其协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 106-113.
- MENG Yan-feng, HU Shu-ju, WANG Ling-ling, et al. Characteristics analysis and coordinated control of the doubly-fed wind power system under grid transient fault[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 106-113.
- [13] 熊小伏, 欧阳金鑫. 电网短路时双馈感应发电机转子电流的分析与计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 114-121.
- XIONG Xiao-fu, OUYANG Jin-xin. Analysis and calculation of rotor currents for doubly-fed induction generators under short circuits in power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 114-121.
- [14] ZHENG Zhong, YANG Geng, GENG Hua. Short circuit current analysis of DFIG-type WG with crowbar protection under grid faults[C] // 2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2012: 1072-1079.
- [15] 蔡帜, 刘建政, 梅红明, 等. 双馈风力发电机在电网电压小幅骤降时的保护策略[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 41-44.
- CAI Zhi, LIU Jian-zheng, MEI Hong-ming, et al. Protection strategy of DFIG under grid voltage narrow dip[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 41-44.
- [16] Lopez J, Gubia E, Sanchis P. Wind turbines based on doubly fed induction generator under asymmetrical voltage dips[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2008, 23(1): 321-330.
- [17] 贺益康, 胡家兵, 徐烈. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [18] 刘万顺, 黄少锋, 徐玉琴. 电力系统故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

收稿日期: 2013-05-15; 修回日期: 2013-07-04

作者简介:

郑涛(1975-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源电力系统保护与控制; E-mail: zhengtao_sf@126.com

魏占朋(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源电力系统保护与控制; E-mail:wzphd001@126.com

李娟(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源电力系统保护与控制。