

# 兆瓦级双馈风电机组电网故障时的暂态分析

吕志强, 许国东

(浙江运达风电股份有限公司, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 以 1.5 MW 双馈式风力发电机组为研究对象, 通过分析双馈式异步发电机的暂态电气关系, 给出了电网三相短路故障时双馈式异步电机的定子绕组暂态电流和转子绕组暂态电流的计算方法。建立双馈式风电机组的并网模型, 并进行了电网三相短路故障的仿真, 仿真结果验证了暂态响应算法的有效性。对双馈式风电机组的 Crowbar 电路的作用进行了理论分析和仿真研究, 采用 Crowbar 电路时风电机组的暂态响应比未采用该电路时有了明显改善。

**关键词:** 风力发电; 双馈异步电机; 暂态分析; 短路故障; Crowbar 电路

## Transient analysis of grid short circuit fault of megawatt doubly fed wind turbine

Lü Zhi-qiang, XU Guo-dong

(Zhejiang Windey Engineering Co., Ltd, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** Taking 1.5 MW doubly fed wind turbine as the research object, the calculation method of stator transient current and rotor transient current of as grid three-phase short circuit fault occurs is presented through analyzing the transient equations. Model of doubly fed wind turbine connected to grid is built, and simulation experiment of grid three-phase short circuit fault is carried out. The simulation results prove the feasibility of transient response calculation method. Then the function of Crowbar circuit for doubly fed wind turbine is studied through theoretical analysis and simulation experiment, and the results show that the transient response of wind turbine generators is improved after adopting the Crowbar circuit.

This work is supported by National High Technology Research and Development of China(863 Program)(No.2007AA05Z447).

**Key words:** wind turbine; doubly fed induction generator; transient analysis; short circuit fault; Crowbar circuit

中图分类号: TM315; TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0112-05

## 0 引言

近几年, 风力发电规模迅速扩大, 2008 年新增装机容量 624.6 万 kW, 比 2007 年增长 89%<sup>[1]</sup>。2009 年上半年新增装机容量已达 444 万 kW, 全年新增装机容量将突破 1000 万 kW, 其中兆瓦级变桨变速型风电机组占据了绝大部分份额。

兆瓦级风电机组中, 双馈机型是市场主流产品, 具有技术成熟、变流器容量小、成本较低、性能优良等优点, 可以具备有功和无功调节、低电压穿越等电网支撑功能, 能满足日益严格的并网标准的要求。国内外绝大多数厂商, 包括已运行的 5.0 MW 机型, 均采用了双馈式风电机组。

双馈式风电机组在电网发生短路故障时, 定、

转子绕组上会感应出非常大的暂态电流<sup>[2]</sup>, 并且由于电网电压降低, 转子回路中的变流器将积聚较多能量, 直流母线电压升高, 这将对风电机组的安全造成很大影响。因此, 研究电网故障时双馈式风电机组的暂态响应对风电机组的控制系统和保护电路的设计有重要意义。

相比其他类型的短路故障而言, 电网三相短路故障的影响最为严重, 是电网短路故障中的极端状况。国内外学者对应用广泛的异步感应电机在电网三相短路故障时的暂态响应进行了深入研究<sup>[3-5]</sup>。Johan Morren 等在异步感应电机暂态分析理论的基础上提出了双馈式异步发电机的定子绕组暂态电流的计算方法<sup>[6-8]</sup>, 国内学者也进行了相关研究<sup>[9]</sup>。但与异步感应电机不同的是, 双馈式异步风力发电机组的转子侧连接有变流器, 其转子绕组的暂态响应变流器有至关重要的意义, 尽管可以采用 Crowbar 电路对变流器提供保护<sup>[10-12]</sup>, 但是对双馈

式异步电机转子绕组的暂态响应以及 Crowbar 电路保护效果的研究依然十分缺乏。本文对此展开研究, 提出了双馈式异步电机转子绕组暂态电流的计算方法, 并且用 Matlab/Simulink 对双馈式风力发电机的定子绕组和转子绕组的暂态响应电流进行了仿真研究, 最后, 对 Crowbar 电路的保护作用进行了理论分析和仿真验证。

## 1 双馈式电机的暂态分析

本文研究对象是额定功率为 1.5 MW 的变桨变速双馈式风电机组, 发电机额定转速是  $1800 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , 转子回路中串联变流器。在较低的风速下, 依照最佳叶尖速比调节风轮转速, 保证捕获最多的风能; 风速较大时, 通过变桨矩系统调节桨叶角度, 使风机功率稳定在额定功率。双馈式风电机组主回路结构如图 1 所示。

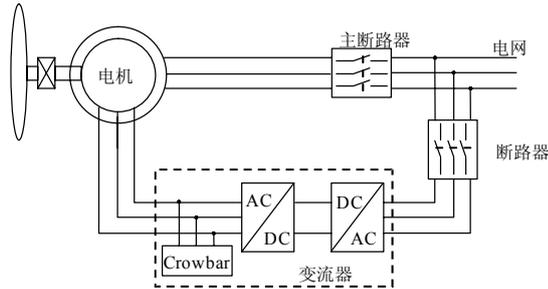


图 1 双馈式机组主回路图

Fig.1 Doubly fed wind turbine main circuit

双馈式异步电机本质上是绕线式异步电机, 其 a 相稳态等效电路图如图 2 所示。

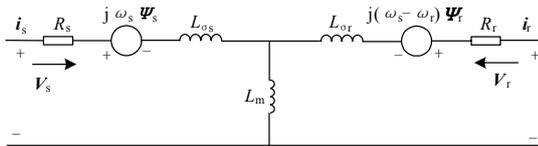


图 2 双馈电机等效电路

Fig.2 Doubly fed induction generator equivalent circuit

其中:  $V_s$  是定子相电压向量;  $i_s$  是定子电流向量;  $R_s$  是定子电阻;  $\Psi_s$  是定子磁通向量;  $\omega_s$  是同步转速;  $\omega_r$  是转子转速;  $L_{\sigma s}$ 、 $L_m$  和  $L_{\sigma r}$  分别是定子漏感、激磁电感和转子漏感;  $\Psi_r$  是转子磁通向量;  $R_r$  是转子电阻;  $i_r$  是转子电流向量;  $V_r$  是转子电压向量。

由图 2 可得双馈电机的电气方程:

$$V_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_s \psi_s \quad (1)$$

$$V_r = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j(\omega_s - \omega_r) \psi_r \quad (2)$$

$$\psi_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (3)$$

$$\psi_r = L_m i_s + L_r i_r \quad (4)$$

其中,  $L_s = L_{\sigma s} + L_m$ ,  $L_r = L_{\sigma r} + L_m$ 。由式 (3)、式 (4) 可得:

$$i_s = \frac{1}{L_s - \frac{L_m^2}{L_r}} \psi_s - \frac{L_m}{L_r} \frac{1}{L_s - \frac{L_m^2}{L_r}} \psi_r \quad (5)$$

$$i_r = -\frac{L_m}{L_s} \frac{1}{L_r - \frac{L_m^2}{L_s}} \psi_s + \frac{1}{L_r - \frac{L_m^2}{L_s}} \psi_r \quad (6)$$

暂态分析时, 可以忽略掉定子电阻<sup>[13]</sup>, 因此在静止坐标系下的定子电流为:

$$\sqrt{2}i_s e^{j\omega_s t} = \frac{\sqrt{2}V_s e^{j\omega_s t}}{j\omega_e L_s} \quad (7)$$

其中:  $\omega_e = 2\pi f$ ,  $i_s$  是定子电流有效值;  $V_s$  是定子电压有效值。因此, 定子磁通向量可表示为式 (8)。

$$\psi_s = \sqrt{2}i_s e^{j\omega_s t} L_s = \frac{\sqrt{2}V_s}{\omega_e} \cos(\omega_s t) \quad (8)$$

转子磁通表示为:

$$\psi_r = \sqrt{2}i_s e^{j\omega_s t} L_m = \frac{L_m \sqrt{2}V_s}{L_s \omega_e} \cos(\omega_s t) \quad (9)$$

当电网发生三相对称短路时, 在发生短路的  $t=0$  时刻, 由于磁通不会发生突变, 在  $t=0_+$  (刚发生短路) 时刻, 定子磁通为:

$$\psi_{s0} = \frac{\sqrt{2}V_s}{j\omega_e} \cos \alpha \quad (10)$$

其中,  $\alpha$  是  $t=0$  时的相角, 即初始相角。

转子磁通是跟随转子绕组旋转的, 其转速近似于同步转速  $\omega_s$ , 因此, 在静止参考坐标系下, 转子磁链为:

$$\psi_{r0} = \frac{L_m \sqrt{2}V_s}{L_s \omega_e} \cos(\omega_s t + \alpha) \quad (11)$$

将式 (10)、式 (11) 代入式 (5)、式 (6), 分别得  $t=0_+$  (刚发生短路) 时定子电流向量  $i_{s0}$  和转子电流向量  $i_{r0}$  为:

$$i_{s0} = \frac{\sqrt{2}V_s}{\omega_e L'_s} \left[ \cos \alpha - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \cos(\omega_s t + \alpha) \right] \quad (12)$$

$$i_{r0} = \frac{\sqrt{2}V_s}{\omega_e L'_r} \frac{L_m}{L_s} [-\cos \alpha + \cos(\omega_s t + \alpha)] \quad (13)$$

$$\text{其中: } L'_s = L_{\sigma s} + \frac{L_{\sigma r} L_m}{L_{\sigma r} + L_m} \quad (14)$$

$$L'_r = L_{\sigma r} + \frac{L_{\sigma s} L_m}{L_{\sigma s} + L_m} \quad (15)$$

短路故障发生后, 定子绕组和转子绕组的暂态电流并不是一成不变的, 会随着时间的增加, 分别以定子暂态时间常数  $T'_s$  和转子暂态时间常数  $T'_r$  衰减<sup>[14]</sup>。

$$T'_s = \frac{L'_s}{R_s} \quad (16)$$

$$T'_r = \frac{L'_r}{R_r} \quad (17)$$

因此, 在电网发生三相短路故障后, 定子暂态电流向量  $i_s$  和转子暂态电流向量  $i_r$  的暂态响应数学表达式分别为:

$$i_s = \frac{\sqrt{2}V_s}{\omega_e L'_s} \left[ e^{-t/T'_s} \cos \alpha - \frac{L_m^2}{L_s L_r} e^{-t/T'_r} \cos(\omega_s t + \alpha) \right] \quad (18)$$

$$i_r = \frac{\sqrt{2}V_s L_m}{\omega_e L'_r L_s} \left[ -e^{-t/T'_s} \cos \alpha + e^{-t/T'_r} \cos(\omega_s t + \alpha) \right] \quad (19)$$

风电机组的双馈式异步电机参数为定子电阻  $R_s=3.26 \times 10^{-3} \Omega$ , 转子电阻  $R_r=2.7 \times 10^{-3} \Omega$ , 定子漏感  $L_{\sigma s}=5.68 \times 10^{-5} \text{ H}$ , 转子漏感  $L_{\sigma r}=3.35 \times 10^{-5} \text{ H}$ , 激磁电感  $L_m=5.57 \times 10^{-3} \text{ H}$ 。电机同步转速  $\omega_s=1\ 500 \text{ rpm}$ , 额定相电压  $V_s=400 \text{ V}$ 。根据式 (18) 和式 (19) 可得定子暂态电流和转子暂态电流的时域波形图 (假设  $\alpha=0$ ), 如图 3 曲线 1 和图 4 曲线 1 所示。

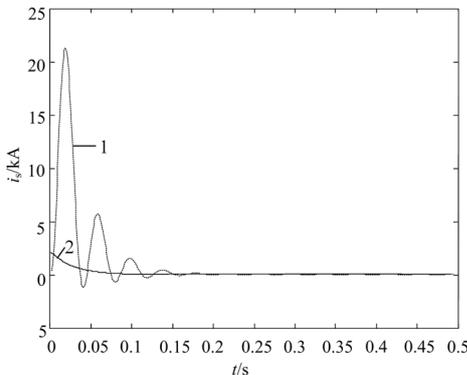


图 3 定子暂态电流波形  
Fig.3 Stator transient current curve

从图 3 曲线 1 可以看出, 定子电流在电网短路故障发生后迅速增大, 达到 20 kA 左右, 然后振荡衰减, 大约经过 0.15 s 后衰减到零值附近。图 4 曲

线 1 是转子绕组的暂态电流波形, 负号表示电流的流向与图 2 中  $i_r$  标示的方向相反, 可以看出转子暂态电流的趋势与定子暂态电流基本相同, 达到的峰值和衰减的时间也基本一致。

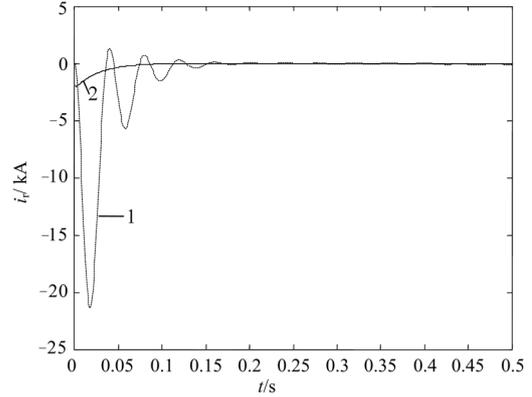


图 4 转子暂态电流波形

Fig.4 Rotor transient current curve

电网故障发生后, 由于转子绕组继续旋转, 在近似稳定的磁场中产生暂态能量, 继而感应到定子绕组, 所以对图 3 曲线 1 和图 4 曲线 1 进行对比也可以看出, 转子暂态电流稍稍超前于定子暂态电流, 并且其直流分量也略大于定子暂态电流。

定子电流数学模型和转子电流数学模型中, 电机参数为电机的固有参数, 忽略温度、饱和效应等影响, 可近似认为不随时间变化。因此, 以时间  $t$  和相角  $\alpha$  为二元变量, 可以利用数学解析法求出定子暂态电流和转子暂态电流的极值和达到极值的条件。

## 2 仿真研究

双馈式风机机组的并网模型结构如图 5 所示, 仿真工具采用 Matlab/Simulink。电网为无限大电网模型, 220 kV 电网经降压变压器转换为 35 kV 电网, 经过 10 km 输电线传输至风电场箱式变压器, 连接风电机组。短路故障发生在风电机组出口侧, 假设短路故障为金属性短路, 短路电阻很小, 取  $0.001 \Omega$ 。

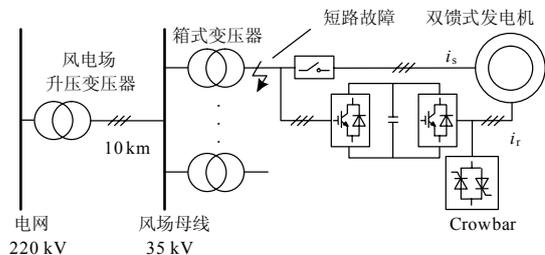


图 5 并网模型结构

Fig.5 Simulation configuration

传动系统折算到高速轴的转动惯量  $J=340 \text{ kg/m}^2$ , 发电机额定转矩为  $T_N=8.3 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。短路故障发生前异步发电机处于额定工作状态。

在  $t=0 \text{ s}$  时, 电网线路发生三相对称金属性短路, 其中 a 相的定子暂态电流波形如图 6 曲线 1 所示, 峰值为  $16 \text{ kA}$  左右, 比第 1 节中的理论计算值略小, 其原因是前述理论计算中未计入线路阻抗。定子暂态电流的振荡衰减时间在  $0.15 \text{ s}$  左右, 这也符合前面理论模型的结论。

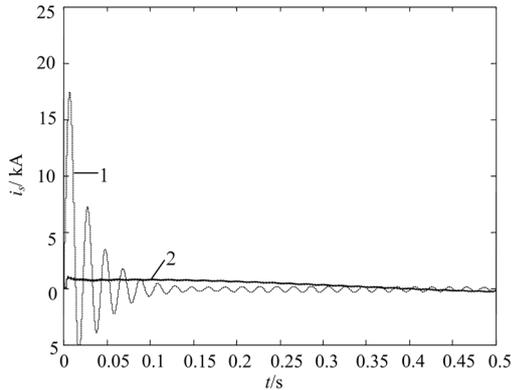


图 6 定子暂态电流

Fig.6 Stator transient current

图 7 曲线 1 所示的是 a 相的转子暂态电流波形, 电流峰值约为  $16 \text{ kA}$ , 并且峰值出现在负号方向, 与理论模型的分析是相同的。同样地, 转子暂态电流的振荡趋势和衰减时间与定子暂态电流是类似的。

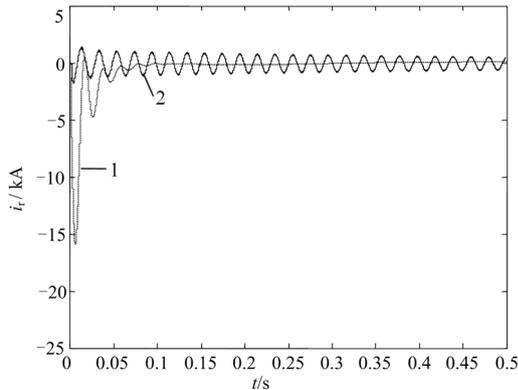


图 7 转子暂态电流

Fig.7 Rotor transient current

双馈式电机的电磁转矩波形如图 8 曲线 1 所示, 在电网短路故障后电磁转矩先是迅速增大, 瞬时值达到  $90 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 然后振荡减小。电磁转矩短时间内的巨大脉动可能会对风发电机组的传动链造成不良影响。

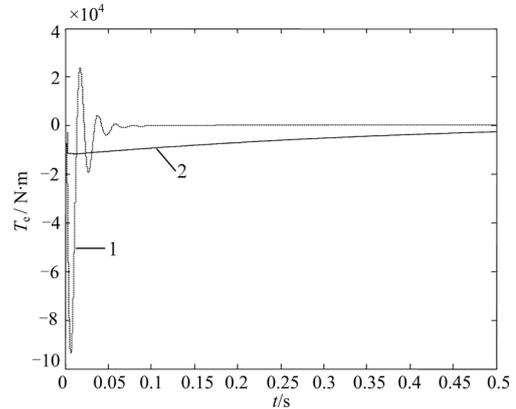


图 8 电磁转矩波形

Fig.8 Electro-magnetic torque curve

### 3 Crowbar 电路

电网发生短路故障后, 电网电压跌落, 风力发电机组出口电压降低, 但是由于发电机内磁通不能突变, 在故障发生后的短时期内, 风轮带动电机旋转仍然会感应出电能。这部分电能由于风力发电机组出口电压的低落无法输送到电网, 将在电机和变流器内部积聚起来, 形成非常大的感应电流和变流器直流母线电压的升高, 这可能会对风力发电机组造成损坏<sup>[6]</sup>。前面的仿真结果也说明了这一点。

为了能及时泄放掉电网短路故障引起的这部分积聚电能, 通常在双馈电机的转子回路中并联有源 Crowbar 或者无源 Crowbar。同时, 封锁变流器的 IGBT 使能信号, 以保护变流器的安全。Crowbar 电路的安装位置见图 1 所示。

当电网发生短路故障时, Crowbar 电路检测变流器的直流母线电压升高到预设值, 则将 Crowbar 的电阻投切到转子回路中。式 (18) 和式 (19) 中的  $\omega_e L'_s$  和  $\omega_e L'_r$  实质是定子暂态等效阻抗  $X'_s$  和转子暂态等效阻抗  $X'_r$ , 因此, 当激活 Crowbar 电阻后定子暂态等效阻抗和转子暂态等效阻抗变为  $X'_{scb} = \sqrt{X'^2_s + R_{cb}^2}$  和  $X'_{rcb} = \sqrt{X'^2_r + R_{cb}^2}$ 。所以, 带有 Crowbar 电路的定子电流分量和转子电流分量的数学表达式变为:

$$\dot{i}'_s = \frac{\sqrt{2}V_s}{X'_{scb}} \left[ e^{-t/T'_r} \cos \alpha - \frac{L'_m}{L_s L'_r} e^{-t/T'_{rcb}} \cos(\omega_s t + \alpha) \right] \quad (20)$$

$$\dot{i}'_r = \frac{\sqrt{2}V_s}{X'_{rcb}} \frac{L'_m}{L_s} \left[ -e^{-t/T'_r} \cos \alpha + e^{-t/T'_{rcb}} \cos(\omega_s t + \alpha) \right] \quad (21)$$

其中,  $T'_{rcb} = \frac{L'_r}{R_r + R_{cb}}$ 。

Crowbar 电路的通路电阻是一个非常重要的参数, 如果电阻值过大, 暂态电流会较小, 但变流器的直流母线电压可能过高; 如果电阻值过小, 直流母线电压不会太高, 但暂态电流可能会很大。因此, 该电阻值的选取需要平衡考虑。选取原则可参见文献[8], 本文不进行详细讨论。

该风电机组的变流器中 Crowbar 电路采用的通路电阻为  $R_{cb}=0.25 \Omega$ 。根据式 (20) 和式 (21) 可得 Crowbar 电路投入后的定子暂态电流波形和转子暂态电流波形, 分别如图 3 曲线 2 和图 4 曲线 2 所示, 两者的峰值都没有超过 2 kA, 可见 Crowbar 电路很好地抑制了暂态电流的峰值。

在仿真模型中, 当检测到直流母线电压  $V_{dc}$  超过 1 210 V 时激活 Crowbar 电路。电网三相短路故障发生在  $t=0$  s。

在电网短路故障发生后, 变流器的直流母线电压迅速上升到 1 210 V, 激活了 Crowbar 电路。Crowbar 电路投入后, 风电机组暂态积聚的电能得到迅速释放, 直流母线电压开始缓慢下降, 见图 9 所示。

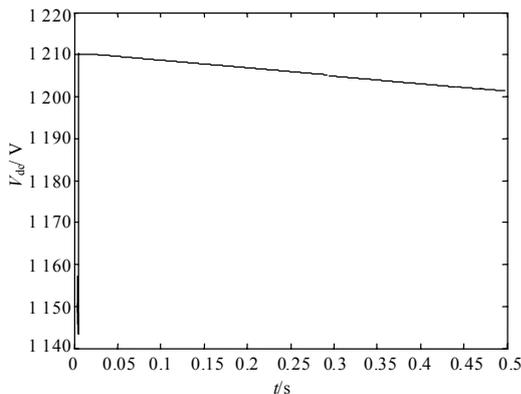


图 9 有 Crowbar 时的直流母线电压波形

Fig.9 DC voltage curve with Crowbar

由于暂态电流得到抑制, 风电机组的电磁转矩  $T_e$  脉动很小, 不到 12 kN·m, 如图 8 曲线 2 所示, 远小于未使用 Crowbar 电路时电磁转矩的脉动幅度。

#### 4 结论

在电网发生三相短路故障时, 双馈式风力发电机组的磁链不能发生突变, 高速旋转的转子切割磁链会感应出很大的电能, 由于电网电压跌落, 风电机组的电能一方面会以非常大的暂态电流表现出

来, 另一方面会在变流器内积聚, 升高直流母线电压, 这两方面都可能对风电机组造成损害。

本文在双馈式异步电机稳态等效电路的基础上, 对其电气回路关系进行暂态分析, 得出了双馈式异步电机的定子暂态电流和转子暂态电流的计算方法, 以 1.5 MW 双馈式风电机组为例, 其定子暂态电流和转子暂态电流的峰值达到 20 kA 左右, 然后振荡衰减; 在 Matlab/Simulink 建立了双馈式风电机组的并网模型, 并进行了电网电压三相短路故障仿真, 验证了暂态响应算法的有效性; 最后, 对 Crowbar 电路的保护作用进行了理论分析和仿真研究, 结果表明采用 Crowbar 电路的双馈式风电机组的暂态响应有了明显改善。

#### 参考文献

- [1] 施鹏飞. 2008年中国风电装机容量统计[EB/OL]. [2009-04-01]. www.cwea.org.cn/upload/20090305.pdf. SHI Peng-fei. Summation of 2008 China wind turbines installation[EB/OL]. [2009-04-01]. www.cwea.org.cn/upload/20090305.pdf.
- [2] Paap G C, Jansen F, Wiercx F K A M. The influence of voltage sags on the stability of 10 kV distribution networks with large-scale dispersed co-generation and wind generators[C]. //IEEE Power Tech Conference. 2001.
- [3] Jadric M, Francic B. The dynamics of electrical machines[M]. Zagreb: Graphis, 1997.
- [4] Zlatko Maljkovic, Mirko Cettolo, Milutin Pavlica. The impact of the induction motor on short-circuit current[C]. //IEEE/IAS Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference. 1999.
- [5] 赵宏伟, 毕天姝, 秦晓辉. 异步机型分布式电源暂态稳定研究[C]. //中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十二届学术年会. 2006. ZHAO Hong-wei, BI Tian-shu, QIN Xiao-hui. Research on transient stability of distribution asynchronous generator[C]. //China Universities Annual Conference on Electric Power Systems & Automation, 2006.
- [6] Johan Morren, de Haan S W H. Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20 (2) : 435-441.
- [7] Francoise Mei, Bikash C Pal. Modeling and small-signal analysis of a grid connected doubly-fed induction generator[C]. //Proceeding of IEEE PES General Meeting. 2005, 3: 2101-2108.
- [8] Johan Morren, Sjoerd W H. de Haan. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2007, 22 (1) : 174-180.

(下转第 125 页 continued on page 125)

- [11] 井天军, 杨明皓. 农村户用风/光/水互补发电与供电系统的可行性[J]. 农业工程学报, 2008, 24 (7): 178-181.  
JING Tian-jun, YANG Ming-hao. Hybrid household generation and supply system with wind-solar-hydro power for rural areas[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24 (7): 178-181.
- [12] YANG Ji-tao, YANG Shi-guan, MU Jin-hua. Actuality and prediction of rural household energy consumption in Laojunshan area of Northwest Yunnan[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008, 29 (5): 624-629.
- [13] 王成山, 王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (20): 1-4.  
WANG Cheng-shan, WANG Shou-xiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (20): 1-4.
- [14] 雷金勇, 谢俊, 甘德强. 分布式发电供能系统能量优化及节能减排效益分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (23): 29-36.  
LEI Jin-yong, XIE Jun, GAN De-qiang. Optimization of distributed energy system and benefit analysis of energy saving and emission reduction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 29-36.
- [15] 王志红, 刘守华. 沼气发酵能量转换效率的研究[J]. 辽宁师专学报: 自然科学版, 2002, 4 (3): 84-87.
- [16] 苏亚欣, 毛玉如, 赵敬德. 新能源与可再生能源概率[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [17] 王承熙, 张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [18] 薛桁, 朱瑞兆, 杨振斌, 等. 中国风能资源贮量估算[J]. 太阳能学报, 2001, 22 (2): 169-170.  
XUE Heng, ZHU Rui-zhao, YANG Zhen-bin, et al. Assessment of wind energy reserves in China[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2001, 22 (2): 169-170.
- [19] 赵争鸣, 刘建政, 孙晓瑛, 等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [20] 王长贵, 王斯成. 太阳能光伏发电实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [21] 车孝轩. 太阳能光伏系统概论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.

收稿日期: 2009-11-19; 修回日期: 2010-02-05

作者简介:

张帆(1982-), 女, 博士, 研究方向为农村可再生能源发电与控制; E-mail: zhangfan1@cau.edu.cn

杨明皓(1953-), 女, 教授, 研究领域为农村电力网、农村可再生能源发电工程、电力系统自动化技术。

(上接第 116 页 continued from page 116)

- [9] 张学广, 徐殿国, 李伟伟. 双馈风力发电机三相短路电流分析[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(5): 493-497.  
ZHANG Xue-guang, XU Dian-guo, LI Wei-wei. Analysis of three-phase short circuit current of doubly fed induction generator[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12 (5): 493-497.
- [10] Niiranen J. Voltage dip ride through of doubly-fed generator equipped with Aaive crowbar[C]. //Nordic Wind Power Conference. 2004.
- [11] Dittrich A, Stoev A. Comparison of fault ride-through strategies for wind turbines with DFIM generators[C]. //11th Europe Power Electronics and Applications Conference. 2005.
- [12] 姚俊, 廖勇. 基于 Crowbar 保护控制的交流励磁风电系统运行分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (23): 79-83.  
YAO Jun, LIAO Yong. Analysis on the operations of an AC excited wind energy conversion system with Crowbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (23): 79-83.
- [13] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 三版. 北京: 中国电力出版社, 2007.  
LI Guang-qi. Power system transient analysis[M]. 3<sup>rd</sup> edition. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [14] 汤蕴缪, 张奕黄, 范瑜. 交流电机动态分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.  
TANG Yun-qiu, ZHANG Yi-huang, FAN Yu. AC machine dynamic analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

收稿日期: 2009-12-03; 修回日期: 2010-02-20

作者简介:

吕志强(1983-), 男, 工程师, 工学硕士, 主要研究方向为电力电子与并网技术; E-mail: lvzq@chinawindec.com

许国东(1979-), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为并网型风力发电机组的控制技术。