

主动撬棒技术及其对双馈风电机组影响研究

凌 禹

(山西大同大学电气工程系, 大同 037003)

摘 要: 详细分析不同撬棒电阻阻值对系统功率、电磁转矩、转子电流和电压、直流侧母线电压等具有不同特点的影响。基于此,进一步优化撬棒阻值范围。利用PSCAD/EMTDC仿真软件,在2组不同参数的双馈机组模型中,验证所得结果及其具有的一般性。

关键词: 风力发电; 保护电路; 瞬态分析; 双馈感应电机

中图分类号: TM614

文献标识码: A

0 引 言

现代电网导则要求,风电机组要想接入电网运行,应保证具备故障穿越(FRT)能力^[1]。双馈风电机组(DFIG)定子绕组与电网直接相连,其对电网扰动,尤其是电压跌落最敏感。电网电压跌落将导致双馈电机转子过电流,其幅值可达额定值的5~10倍^[2],造成变换器的破坏。

目前,通常使用一组旁路电阻即所谓的撬棒电路,接入转子电路,以限制故障时的转子过电流。这种方法能够保证机组不间断并网运行,满足现代电网对风电机组故障穿越能力的要求^[3]。然而,撬棒电路保护效果受多种因素限制,尤其是其投切时机和电阻值的大小是影响整个保护装置的成败的关键因素,得到广大科研人员的广泛关注。文献[4,5]重点通过完善撬棒电路的投切策略,进一步提高了撬棒电路改善机组穿越性能的能力,减弱对系统稳定性的影响。而文献[5,6]则从撬棒电路阻值的选取出发,确定合适的撬棒阻值范围,以有效抑制转子故障电流。

本文首先理论分析撬棒电路电阻取值范围,然后优化其取值范围,最后验证该阻值范围的正确性及其具有的一般性。其优点是便于阻值的选取和

确保其对故障期间以及故障切除后机组运行负面影响最小。

1 系统描述

如图1所示,双馈风电机组主要由风轮、齿轮箱、双馈电机、转子侧变换器、网侧变换器以及撬棒电路等组成。变换器的控制主要采用矢量控制的方法,在理想电网条件下,其能够实现有功和无功功率的解耦控制。通常,网侧变换器的控制目标是确保直流侧电压稳定,而转子侧变换器则负责有功和无功功率的解耦控制。撬棒电路主要是确保故障时变换器不被过电流损坏。

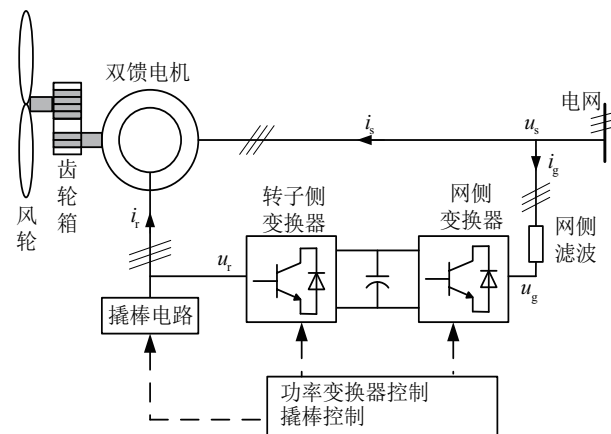


图1 双馈风电机组并网运行控制框图

Fig. 1 Control block diagram of a DFIG wind turbine

收稿日期: 2016-04-29

基金项目: 山西省自然科学基金(2015011065); 大同市基础研究项目(2015112)

通信作者: 凌 禹(1975—), 男, 博士、副教授, 主要从事风力发电等方面的研究。pleasurely@126.com

2 撬棒电路技术分析及其控制

2.1 撬棒电路拓扑及其模型

图 2 给出了 2 种典型的撬棒电路拓扑。其中图 2a 所示为由放在三相电路里的三对反并联的晶闸管组成,另一种结构如图 2b 所示,由 1 个三相二极管整流桥和 1 只晶闸管组成。如果该电路中的晶闸管被 IGBT 代替,则成为所谓的主动撬棒电路,其电流可通过功率管的自关断能力被强迫关断。

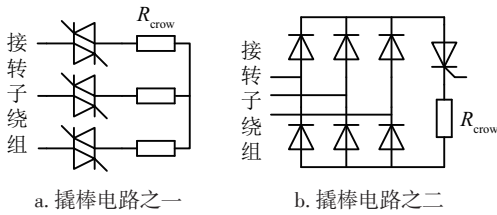


图 2 典型撬棒电路

Fig. 2 Typical crowbar circuit

以图 2a 为例,假设功率器件是理想的,设 S_c 为开关函数,当开关关闭时,其值为 1,否则其值为 0。于是可得撬棒电路的数学模型^[7]:

$$u_{\text{crow}} = S_c R_{\text{crow}} i_{\text{crow}} \quad (1)$$

从式(1)可见,电阻值对故障期间的拓扑性能具有主导地位。合适的阻值应满足以下条件^[8]: 1)要足够大以限制双馈发电机的转子电流;2)同时,不能过大以避免双馈电机转子绕组电压过高。

2.2 转子电流动态以及撬棒电阻值范围确定

采用电动机惯例,全部参数折算到定子侧,利用空间矢量的方法,双馈感应电机在同步旋转坐标系下的数学模型如式(2)~式(5)所示:

$$u_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} - j\omega_1 \psi_s \quad (2)$$

$$u_r = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} - j(\omega_1 - \omega_r) \psi_r \quad (3)$$

$$\psi_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (4)$$

$$\psi_r = L_m i_s + L_r i_r \quad (5)$$

式中, u 、 i 、 ψ 、 R 、 L 、 ω_1 、 ω_r ——电压、电流、磁通、电阻、电感、同步角频率和转子角频率;下标 s 、 r 、 m 分别表示定子量、转子量和互感。

利用式(4)和式(5),并考虑 $L_s = L_{ls} + L_m$, $L_r = L_{lr} + L_m$, 其中 L_{ls} 、 L_{lr} 分别为定转子漏感,以及 $L_m \gg L_{lr}$ 和 $L_m \gg L_{lr}$, 可得定转子电流的表达式分别

如式(5)和(6)所示:

$$i_s = (\psi_s - \psi_r) / (L_{lr} + L_{ls}) \quad (6)$$

$$i_r = (\psi_r - \psi_s) / (L_{lr} + L_{ls}) \quad (7)$$

按照文献[8],当旁路电阻接入转子绕组,且忽略定转子绕组电阻时,双馈发电机在机端短路时的定子最大电流可近似表示为:

$$I_{s \max} \approx 1.8 U_s / \sqrt{X_s^2 + R_{\text{crow}}^2} \quad (8)$$

式中, R_{crow} ——转子旁路电阻; X_s ——电机定子瞬时电感; U_s ——电机定子电压有效值; $I_{s \max}$ ——电机短路时最大定子电流。

按照式(6)和式(7),短路故障时双馈感应电机的最大转子电流与定子最大短路电流一致,即:

$$I_{r \max} \approx I_{s \max} \quad (9)$$

按照旁路电阻要限制转子故障电流在安全范围内的要求,短路故障时的最大转子电流必须满足式(10):

$$I_{r \max} < I_{r \lim} \quad (10)$$

式中, $I_{r \lim}$ ——转子电流的安全限值。

于是,根据式(9)和式(10),可得旁路电阻最小值:

$$R_{\text{crow min}} = \sqrt{3.24 U_s^2 / I_{r \lim}^2 - X_s^2} \quad (11)$$

同时,要求故障电流在旁路电阻上产生的压降不能超过转子侧允许最大安全电压限值 $U_{r \lim}$,而转子侧允许最大电压也可根据变换器直流侧母线电压 $U_{\text{dc lim}}$ 确定^[9],即:

$$\sqrt{3} R_{\text{crow}} I_{r \max} < U_{\text{dc lim}} \quad (12)$$

根据式(9)和式(12),求得旁路电阻最大值为:

$$R_{\text{crow max}} = U_{\text{dc lim}} X_s / \sqrt{9.72 U_s^2 - U_{\text{dc lim}}^2} \quad (13)$$

式中, $U_{\text{dc lim}}$ ——变换器直流侧母线电压安全限值。

3 撬棒电阻阻值范围优化

为了优化撬棒电阻阻值范围,在电力系统专业仿真软件 PSCAD/EMTDC 中,分别建立两套不同功率的双馈机组的详细模型。其中,双馈感应电机参数见表 1。

基于 1# 双馈风电机组仿真模型,考虑最坏的情况,即机组运行在额定工况附近,在 10 s 时电压跌落至 20%,持续时间为 625 ms。其中,撬棒电路在电压跌落时投入,同时封锁转子侧变换器;电压恢复时,撬棒电路退出运行,解除网侧变换器封锁。

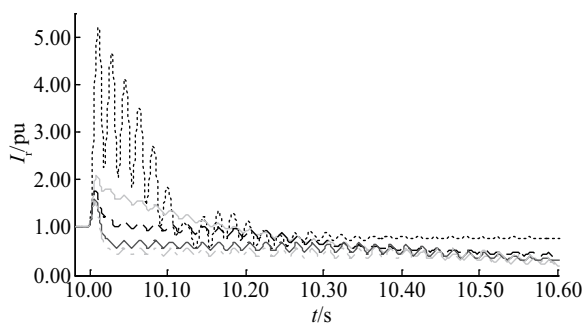
表 1 双馈感应电机参数

Table 1 DFIG parameters

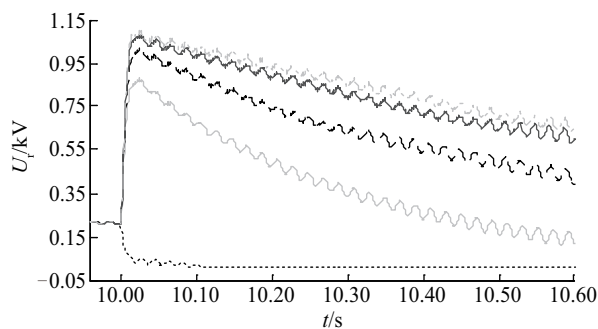
参数	1#电机	2#电机
额定功率 P_n/MW	2.0	1.5
额定电压 U_n/V	690	690
频率 f/Hz	50	50
定子电阻 R_s/pu	0.00488	0.01000
定子漏感 $L_{\sigma s}/\text{pu}$	0.1386	0.1710
转子电阻 R_r/pu	0.00549	0.00549
转子漏感 $L_{\sigma r}/\text{pu}$	0.1493	0.1560
互感 L_m/pu	2.9	2.9
惯性时间常数 H/s	3.5	3.0
匝间比 k	0.45	0.38

图 3a 给出了撬棒电阻不同取值时的转子电压波形。撬棒阻值取 0.0 pu 时,转子故障电流最大值将达到 5~6 倍额定值;当撬棒电阻值取 0.5 pu 以上时,就可抑制到 2.0 pu 以内,并随着阻值增加,转子电流幅值越小,衰减越快。基于此,撬棒技术成为双馈机组提高其故障穿越能力的有效手段。但随着阻值的进一步增加,如取 2.0 pu 以上时,不同阻值对转子故障电流的影响几乎无太大差别。

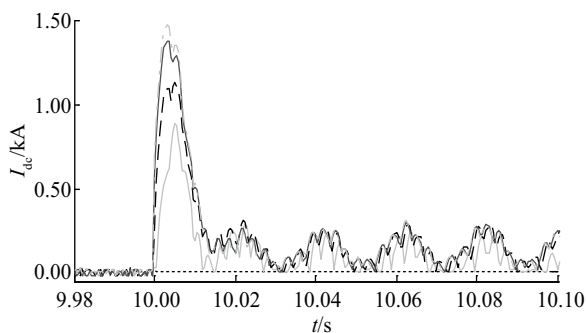
转子故障电流在撬棒电阻上产生的压降,即转子电压波形如图 3b 所示。当撬棒阻值为 0 pu 时,转子电压几乎为零。随着阻值的增加直到 1.0 pu,转子电压幅值一直增加,且对不同的电阻值较敏感。但当阻值在 1.0 pu 以上时,转子电压幅值增幅变化不大,阻值的不同对其影响减弱。按照之前所述,在故障期间,转子电压较大的话,由于转子侧变换器被封锁,其功率管 IGBT 中的续流二极管就可能导通,此时直流侧的输出电流波形如图 3c 所示。当撬棒阻值为 0.0 pu 时,续流二极管不导通;在 0.5~1.0 pu 时,续流二极管导通时间延长,且电流最大值较大,在 0.8~1.2 kA 之间;在 2.0 pu 及以上时,续流二极管在整个故障时间都导通,电流最大值达 1.2 kA 以上。由于电网电压跌落,变换器不能把该电能输送到电网,从而导致直流侧电容充电,使得直流侧电压有不同程度的升高。这一现象如图 3d 所示。撬棒阻值为 0.0 pu 时,对直流侧电压几乎无影响,是转子侧功率管 IGBT 中的续流二极管未导通造成的,但随着阻值的增加,充电电流增加,直流母线电压将大幅升高,因此为了确保直流母线电压安全,尽量选择较小的撬棒电阻。



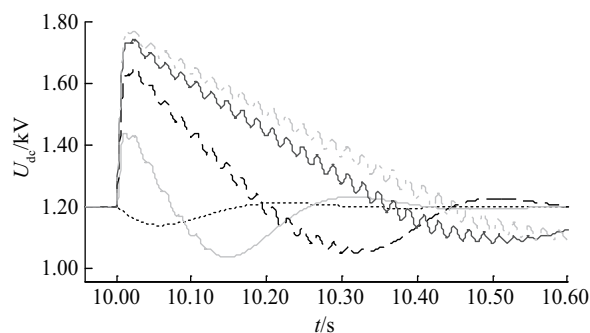
a. 转子电流



b. 转子电压



c. 直流电流



d. 直流电压

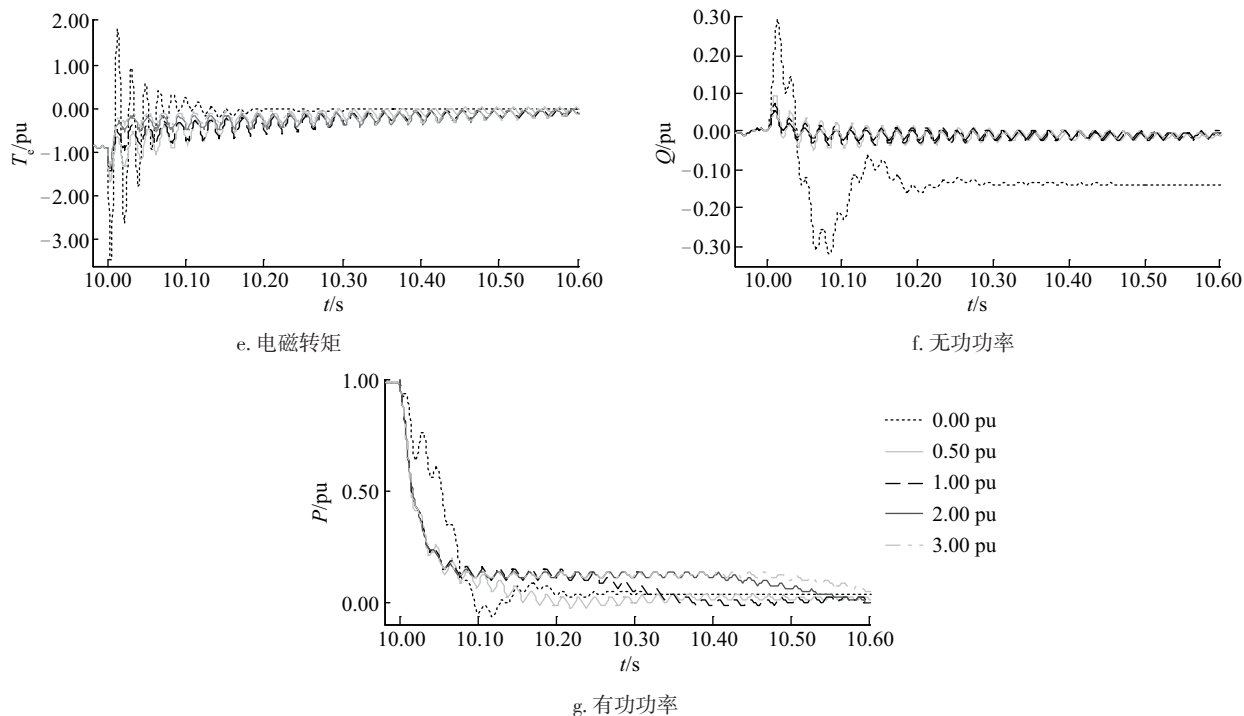


图3 不同撬棒电阻值对双馈风电机组的影响评估波形

Fig. 3 Evaluation of DFIG with different crowbar resistances

图3e给出了撬棒电阻不同取值对电磁转矩的影响。随着阻值的增加,电磁转矩振荡减弱,转矩特性得到改善,从而有利于延长齿轮箱寿命。然而,当阻值在1.0 pu以上时,对转矩特性的影响已不明显。

如图3f所示,不同撬棒电阻值对机组的无功功率具有重要影响。当撬棒阻值为0.0 pu时,双馈风电机组在故障期间向电网吸收大量无功。随着阻值增加,机组对无功的吸收大幅减少。当撬棒阻值达到0.5 pu及以上时,撬棒阻值的增加对改善无功功率的需求几乎无太多变化。

然而,不同撬棒电阻值对机组有功输出的影响却另有特点,较为复杂。按照图3g所示的有功功率输出波形可看出,在故障期间不同时段,不同阻值对机组有功输出的影响不同,无规律可循。粗略地说,阻值在1.0 pu及以上时,更有利于有功输出,从而提高故障期间机组的效率。

综上所述,从抑制转子故障电流,改善机组电磁转矩特性,减少机组无功吸收,提高机组有功输出等方面考虑,要尽可能选择较大的撬棒阻值,但也要保证直流母线电压安全,因此在0.8~1.0 pu范

围选择电阻较为理想。但在采用主动撬棒技术时,考虑到较大的值更有利于减小其运行时间,从而减小撬棒电路对系统的影响;更有利于减少转子侧变换器封锁时间,即减少机组失控时间,从而改善系统转速稳定性的话,在上述得出的阻值范围内,尽可能取较大的撬棒电阻阻值。

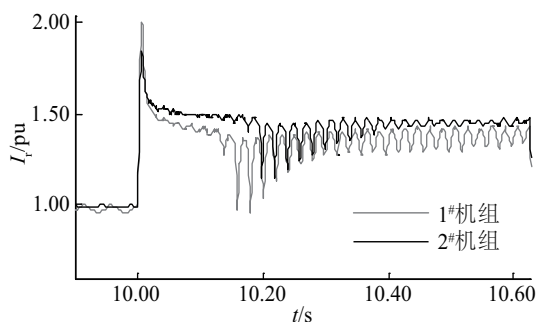
4 仿真验证

为了进一步验证上述结果及其具有的一般性,基于1#和2#双馈风电机组模型进行了仿真验证。考虑最坏的情况即机组运行在额定工附近,电压在10 s时跌落至20%,持续时间为625 ms。旁路电阻值取1.0 pu,撬棒的控制信号由转子电流与其限值比较产生,这里取1.5 pu。

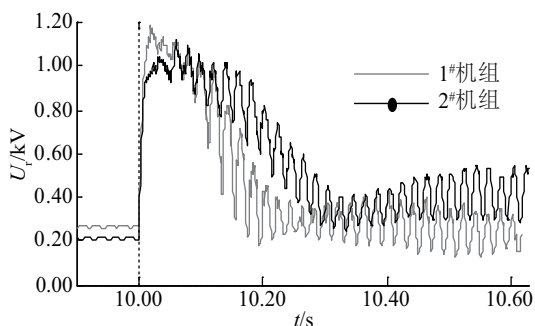
图4分别给出了在故障期间双馈感应电机的转子电流、转子电压、无功功率输出、电磁转矩和直流侧母线电压的波形。从图4a可看出,主动撬棒投入后,很快就把转子故障最大电流衰减在1.5 pu以内,并保证电流的稳定输出。而转子电压最大值、电磁振荡和无功功率也被控制在允许的范围之内。

然而,直流侧母线电压最大值却超过了允许值,因此,需要采用其他措施来抑制其升高,如直流侧卸荷电路等。

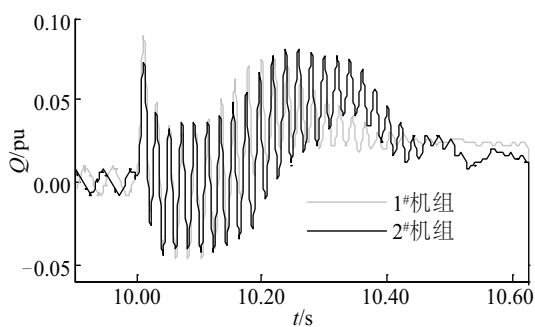
显然,上述仿真进一步验证了所得结果具有的一般性和实用性。



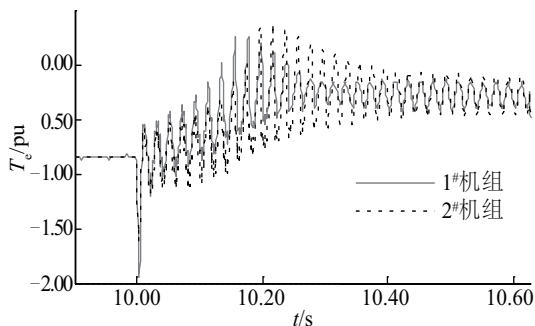
a. 转子电流



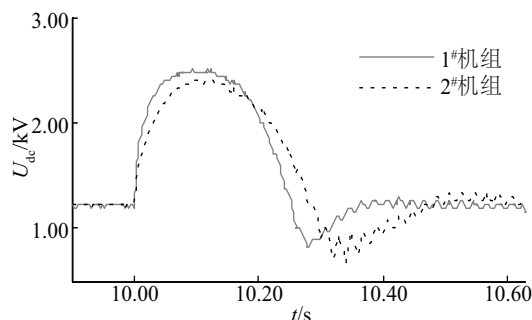
b. 转子电压



c. 无功功率



d. 电磁转矩



e. 直流电压

图4 不同机组的各变量响应波形

Fig. 4 Response waves of different DFIGs

5 结 论

在电压故障期间,撬棒电阻是抑制转子电流的关键因素,其不同值对系统各变量有不同的影响。随着阻值的增加,最大转子电流衰减加快,电磁转矩振荡减小,电机无功吸收减少。但阻值增加到一定程度时,这种作用减弱。

同时,随着阻值的增加,转子电压增加,这将导致转子侧变换器 IGBT 中续流二极管导通,因此,撬棒电阻也受直流侧母线安全电压约束。

然而,在故障期间,不同撬棒电阻值对机组有功输出的和转速的影响却另有特点,较复杂,并无明显规律可循。但在上述阻值范围,仍能够保证其运行最优。

最后,通过仿真和分析,权衡利弊优化了撬棒阻值取值范围,并在不同参数机组的仿真平台上验证了所得结果的正确性和其具有的一般性。

[参考文献]

- [1] Erlich I, Winter W, Dittrich A. Advanced grid requirements for the integration of wind turbines into the Germany transmission system[A]. IEEE Power Engineering Society General Meeting [C], Montreal, 2006.
- [2] Yang J, Dorrell D G, Fletcher J E. A new converter protection scheme for doubly-fed induction generators during disturbances[A]. 34th IEEE Annual Conference on Industrial Electronics, IECON[C], Orlando, USA, 2008, 2100—2105.
- [3] 马文龙. Crowbar保护在双馈异步风力发电系统电网故障穿越中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31

- (7): 127—130.
- [3] Ma Wenlong. Application of crowbar circuit in grid fault riding through for doubly-fed induction wind power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 127—130.
- [4] 孔宪国, 刘宗歧. 基于主动式 Crowbar 的双馈风电机组 LVRT 性能优化分析[J]. 现代电力, 2012, 29(1): 77—81.
- [4] Kong Xianguo, Liu Zongqi. Analysis on LVRT performance optimization of DFIG with active crowbar [J]. Modern Electric Power, 2012, 29(1): 77—81.
- [5] 徐殿国, 王伟, 陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 29—36.
- [5] Xu Dianguo, Wang Wei, Chen Ning. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed Induction generator low voltage ride-through based on crowbar protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 29—36.
- [6] 杜强, 张惠娟, 张同庆. 双馈风力发电机组撬棒电路保护技术的研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(8): 48—92.
- [6] Du Qiang, Zhang Huijuan, Zhang Tongqing. Crowbar circuit protection technology of double-fed induction generators [J]. Power Electronics, 2011, 45(8): 48—92.
- [7] Peng Ling, Francois B, Li Yongdong. Improved crowbar control strategy of DFIG based wind turbines for grid fault ride-through [A]. Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC [C], Washington, DC, USA, 2009, 1932—1938, .
- [8] Morren J, de Haan S W H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2007, 22(1): 174—180.
- [9] 杨耕, 郑重. 双馈型风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电力电子技术, 2011, 45(8): 32—36.
- [9] Yang Geng, Zheng Zhong. Review of low ride-through technology for doubly-fed induction generator based wind energy conversion systems [J]. Power Electronics, 2011, 45(8): 32—36.

ANALYSIS OF ACTIVE CROWBAR CONTROL AND ITS EFFECT ON DOUBLY FED INDUCTION GENERATORS WIND TURBINES

Ling Yu

(Department of Electrical Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, China)

Abstract: The influence of different crowbar resistance values on power, electromagnetic torque, rotor current and voltage, DC bus voltage is analyzed in detail, and based on the range of the crowbar resistance value is further optimized. Finally, using the PSCAD/EMTDC simulation software, the results and their generality are verified in two sets of double fed induction generator (DFIG)-based wind turbine models with different parameters.

Keywords: wind power; protection; transient analysis; doubly fed induction generator(DFIG)