

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.04.014

双馈风电机组高电压穿越技术研究及测试研究^{*}

周 杰¹, 赵豆豆^{1,2}, 杨 靖^{1,2}, 沈 晗³

(1. 浙江运达风电股份有限公司, 浙江 杭州 310012; 2. 风力发电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310012;
3. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200444)

摘要:针对风电机组高电压穿越的问题,对双馈风电机组高电压穿越技术进行了模型仿真分析与现场测试验证。首先,对国内外主流电网运营商对高电压穿越的标准规范要求与技术指标进行了介绍;接着,根据双馈风电机组的特点,电网电压骤升故障对风机系统产生的危害进行了分析;然后,以WD100-2000型双馈风电机组为例,在Matlab/Simulink环境下建立了整机仿真模型,对电网电压骤升故障下双馈风电机组的动态特性进行了仿真分析。最后,联合中国电科院在张北现场进行了国内首次真正意义上的高电压穿越测试。仿真及现场测试结果均表明,机组能够顺利通过所有工况的高电压穿越测试,已经完全具备高电压穿越功能,对风电机组高电压穿越技术的研究及完善国内并网规则具有十分重要的意义。

关键词:双馈风电机组;高电压穿越;模型仿真;现场测试;电网故障

中图分类号:TM315;TK83

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)04-0394-05

Technical research on high voltage ride through and testing

ZHOU Jie¹, ZHAO Dou-dou^{1,2}, YANG Jing^{1,2}, SHEN Han³

(1. Zhejiang Windey Co., Ltd., Hangzhou 310012, China; 2. State Key Laboratory of Wind Power System, Hangzhou 310012, China; 3. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai 200444, China)

Abstract: Aiming at the high voltage ride-through problem of wind turbines, the model simulation analysis and field validation test of high voltage ride-through of DFIG wind turbines was carried out. Firstly, the technical requirements and specifications of high voltage ride-through about the major grid company at home and abroad was introduced; Secondly, according to the character of DFIG wind turbines, the damage of DFIG wind turbines under grid voltage rise was analyzed; And then, as an example, the WD100-2000 model of DFIG wind turbines was built in Matlab/Simulink software, and the dynamic response character of the wind turbine under grid rise fault was simulated and analyzed. Finally, the real meaning field test of high voltage ride-through was done with china electric power research institute. The results of model simulation and field test indicate that the field test of high voltage ride-through is successfully passed, and the high voltage ride-through ability of DFIG wind turbines is completely contained, it is of great significance to perfect the grid rules and the technical research on high voltage ride-through.

Key words: DFIG wind turbines; high voltage ride-through; model simulation; field test; grid fault

0 引 言

随着风电场规模和风力发电容量的不断扩大,风电在电网中所占的比例越来越高。当电网出现故障,如果风电机组与电网解列,无法提供常规能源在电网故障情况下对电网的电压与频率支撑,则可能引起严

重的连锁反应,影响电网的稳定运行^[1]。

近年来,国内多次大量风电机组脱网事故以及国外相关研究表明,在风电场电网低电压故障的故障恢复阶段^[2],由于风电机组无功补偿没有及时退出,可能引起并网接入高压线路的过电压,从而引起电网先低电压后高电压的连锁故障。另外,直流输电线路中

收稿日期:2016-11-11

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2015BAA06B01)

作者简介:周杰(1989-),男,浙江诸暨人,硕士,工程师,主要从事风电变流器研究与应用方面的工作。E-mail:zhouj@chinawindey.net

换流器闭锁或系统干扰,换流桥无功消耗大幅下降时,而无功补偿设备没有及时切出,也会引起供电线路高电压。

目前,国内风电场接入电网准则要求风电场必须具有低电压穿越能力,但是对高电压穿越(HVRT)的技术指标还没有明确的规定。为了提高电力系统运行稳定性和安全性,风电场的高电压穿越能力将逐步成为必然要求。因此,开展风电机组高电压穿越能力的研究与实现对完善国内并网规则具有十分重要的意义^[3,4]。

本研究将开展双馈风电机组在电网电压骤升故障下的技术研究及现场测试工作。

1 国内外高电压穿越技术要求与规范

为了提高电力系统运行安全性,各国逐渐开始关注风电机组的高电压穿越问题,将风电机组的低电压穿越和高电压穿越合并为故障穿越(FRT)。主流的电网运营商包括澳大利亚 AEMC、美国 WECC 与德国 E.ON 等,根据各自电网的结构特点,在故障穿越等方面都有详细的标准规范和技术要求,对风电场的低/高电压穿越边界做出了明确的规定^[5]。

澳大利亚率先制定了真正意义上并网风力发电机的高电压穿越准则^[6],如图1所示。

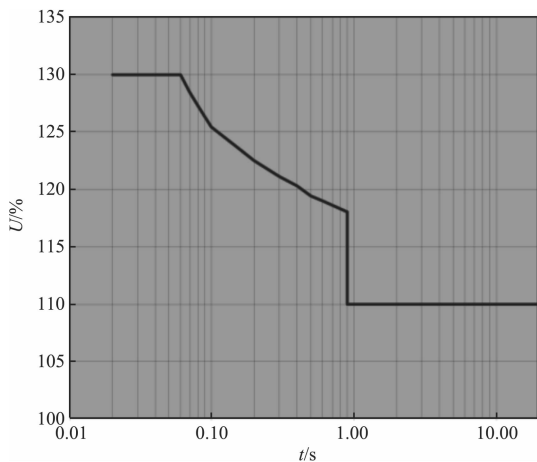


图1 澳大利亚高电压穿越要求

从图1中可知,其要求风电机组在高压侧电网电压升高至130%额定电压时能够保证不脱网连续运行60ms的能力,并提供足够大的故障恢复电流。这一准则明确要求风力发电机组具有高电压穿越能力。

美国 WECC 则要求电压为1.2 pu 时风电场具有1s的高电压穿越能力。德国 E.ON 的风电并网准则中,对高电压下双馈风电机组并网运行,要求在电网电压升至1.2 pu 情况时双馈风电机组能够保持长期不脱网运行,并要求高电压情况下风机需要吸收一定量

的无功功率,体现了高电压下的无功补偿控制要求。

在国内,由中国电科院负责起草的《风电机组高电压穿越能力测试规程》(初稿)对风电机组高电压穿越提出了基本要求,如图2所示。

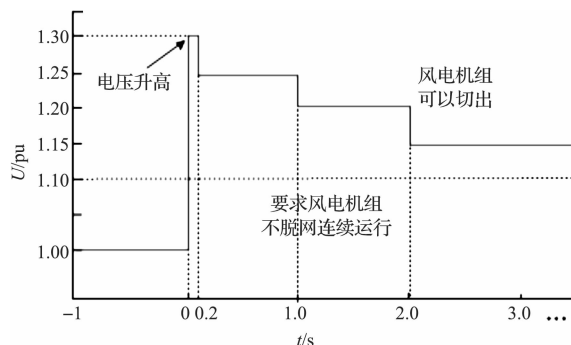


图2 风电机组高电压穿越要求

从图2中可知,当风电场并网点电压且持续时间在图中电压轮廓线及以下的区域内时,风电场内机组必须保证不脱网连续运行;并网点电压且持续时间在图中电压轮廓线以上时,场内风电机组运行脱网。基本的要求如下:

- (1) 风电机组具有在测试点电压升高至130%额定电压时能够保证不脱网连续运行200ms的能力;
- (2) 风电机组具有在测试点电压升高至125%额定电压时能够保证不脱网连续运行1000ms的能力;
- (3) 风电机组具有在测试点电压升高至120%额定电压时能够保证不脱网连续运行2000ms的能力;
- (4) 风电机组具有在测试点电压升高至115%额定电压时能够保证不脱网连续运行10s的能力;
- (5) 风电机组具有在测试点电压升高至110%额定电压时能够保证不脱网连续运行的能力。

2 电网电压骤升时双馈风电机组暂态分析

双馈异步发电机(DFIG)矢量模型定子电压磁链方程如下所示^[7-8]:

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + \frac{dy_s}{dt} \\ U_r = R_r I_r + \frac{dy_r}{dt} + j\omega_r y_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \psi_r = L_m I_s + L_r I_r \end{cases} \quad (2)$$

式中, U_s, U_r —定子、转子端部电压矢量; I_s, I_r —定子、转子绕组中的电流矢量; ψ_s, ψ_r —定子、转子磁链矢量; R_s, R_r —定子、转子电阻; L_s, L_r —定子、转子自感; L_m —互感; ω_r —转子旋转角速度。

经过变换可得发电机转子电压方程:

$$U_r = L_m \left(\frac{d}{dt} - j\omega_r \right) \psi_s + \left[R_r + \sigma L_r \left(\frac{d}{dt} - j\omega_r \right) I_r \right] \quad (3)$$

$$\text{其中, } \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}。$$

由于双馈电机转子电阻较小,忽略转子电流产生的电压降,可得转子开路情况下的电压方程:

$$U_{ro} = L_m \left(\frac{d}{dt} - j\omega_r \right) \psi_s \quad (4)$$

假设当 $t = t_0$ 时刻,电网电压骤升,定子电压方程为:

$$U_s = \begin{cases} U_{se} e^{j\omega_s t} (t < t_0) \\ (1+p) U_{se} e^{j\omega_s t} (t > t_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中: U_{se} —定子电压矢量幅值; p —电压骤升度, $p = (U_s - U_{se})/U_{se}$ 。由式(1,2),得定子磁链方程为:

$$\frac{d\psi_s}{dt} = U_s - \frac{R_s \psi_s}{L_s} \quad (6)$$

因此,可得电压骤升时定子磁链方程为:

$$\begin{aligned} \psi_s &= (1+p) \frac{U_{se}}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} - \\ & p \frac{U_{se}}{j\omega_s} e^{j\omega_s t_0} e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} (t > t_0) \end{aligned} \quad (7)$$

此时,对应的转子开路电压(忽略 $\frac{1}{\tau}$ 项)近似为:

$$\begin{aligned} U_{ro} &= \frac{L_m}{L_s} [s(1+p) e^{j\omega_s t} + \\ & (1-s)p U_{se} e^{j\omega_s t_0} e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}] (t > t_0) \end{aligned} \quad (8)$$

从式(7)可以看出,电网电压骤升时定子磁链有两部分组成。第一部分是电压骤升形成的旋转稳态分量,称为强制磁链分量;第二部分是定子磁链不能突变而产生不旋转的直流分量,称为自由分量。式(8)中的自由分量,即为不旋转的直流分量在转子上感应出的一个大电压。

由上述分析可知,电网电压对称骤升,定子磁链中会出现衰减的直流分量,而对于非对称电压骤升,定子磁链还会出现负序分量,直流分量及负序分量相对于高速运行的双馈发电机形成较大的转差率,进而引起转子侧过电流过电压,最终损坏转子侧变流器。电网电压的骤升会引起变流器对直流电压等环节控制能力的减弱,可能导致直流母线电容损坏。对于风机系统,会引起绝缘薄弱环节的绝缘老化或绝缘下降,严重时会引起绝缘击穿或设备损坏。因此,研究双馈风电机组高电压穿越技术需要解决暂态过程中出现的过电压、过电流和直流母线电压升高等问题,同时,机组在高电压穿越期间向电网提供感性无功功率,以支撑电网电压的恢复^[9-11]。

3 双馈风电机组高电压穿越仿真研究

以 WD100-2000 型双馈风电机组为例,笔者在 Matlab/Simulink 环境下,搭建出该机组的整机仿真模型,并研究在电网电压骤升故障下,双馈风电机组的动态特性。该机组主要参数如下:额定功率 2 000 kW,额定风速 10.5 m/s,风轮直径 100 m,发电机额定转速 1 200 r/min,额定电压 690 V。电机参数(归算到定子侧)如下:定子电阻 0.001 67 Ω ,定子电抗 0.016 Ω ,转子电阻 0.003 9 Ω ,转子电抗 0.054 6 Ω ,励磁电抗 0.782 9 Ω ,转子开口电压 1 763 V,极对数为 3。

假定在第 0.6 s 时刻机组已经进入额定运行状态,在第 0.8 s 时刻电网高压侧(35 kV)分别出现大风工况下对称 130% 电压异常骤升、小风工况下对称 130% 电压异常骤升故障,故障持续 0.7 s 后消除,在第 1.5 s 时刻电网电压恢复正常,风电机组并网点相电压、并网点电流、有功功率与无功功率,直流母线电压的动态变化过程如图 3、图 4 所示。

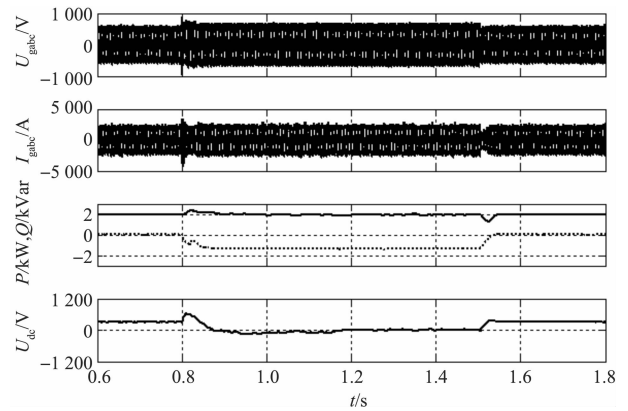


图 3 大风工况,对称 130% 骤升仿真结果

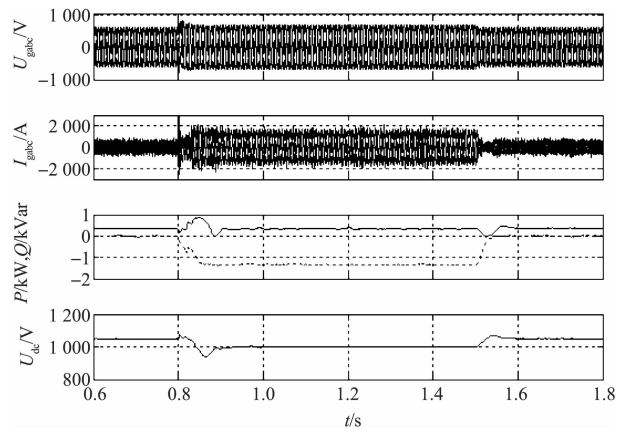


图 4 小风工况,对称 130% 骤升仿真结果

从图 3、图 4 可知:

(1) 当电网高压侧(35 kV)电压骤升到 130% 时,风电机组出口低压侧电压也迅速抬升到 130%;

(2)当检测到电网电压出现异常骤升,风电机组以无功优先的原则迅速响应,提供一定量的感性无功功率以支撑电网电压的恢复;

(3)在电网电压出现异常骤升的整个故障过程中,风电机组依旧保证有功功率的输出,并在电网故障消除后,其有功出力快速恢复。在大风工况下电网故障过程中,由于机组优先保证无功,其有功功率较故障前会有所减小;

(4)在电网电压故障期间,本研究使用特殊的控制策略以拉低直流母线电压以防止母线过压。

4 双馈风电机组高电压穿越现场测试

2015年8~10月,在张北WD100-2000型机组上进行了高电压穿越现场测试。张北风场WD100-2000型机组进行现场高电压穿越测试的照片如图5所示。



图5 现场测试照片

利用阻容分压原理在测试点产生电压升高的发生装置如图6所示。

对于通过35 kV及以下电压等级变压器与电网相连的风电机组,电压升高发生装置串联接入风电机组升压变压器高压侧。

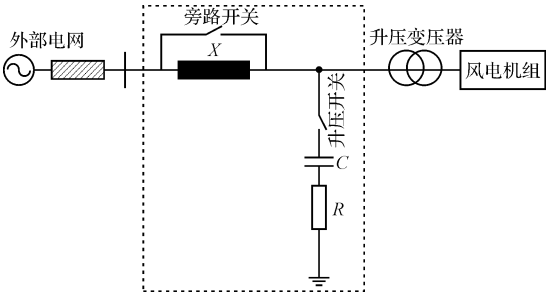


图6 电压升高发生装置示意图

X—限流阻抗,用于限制电压升高对电网及风电场内其他在运行风电机组的影响;在电压升高发生前后,限流阻抗可利用旁路开关短接;C,R—升压阻抗、升压阻尼电阻,闭合升压开关,将升压阻抗和升压阻尼电阻组成的单相支路的三相或两相连接在一起,在测试点产生要求的电压升高

大风工况下对称125%电压异常骤升故障、小风工况下对称130%电压异常骤升故障时,风电机组并

网点相电压、并网点电流、有功功率与无功功率的现场实测波形如图7、图8所示。

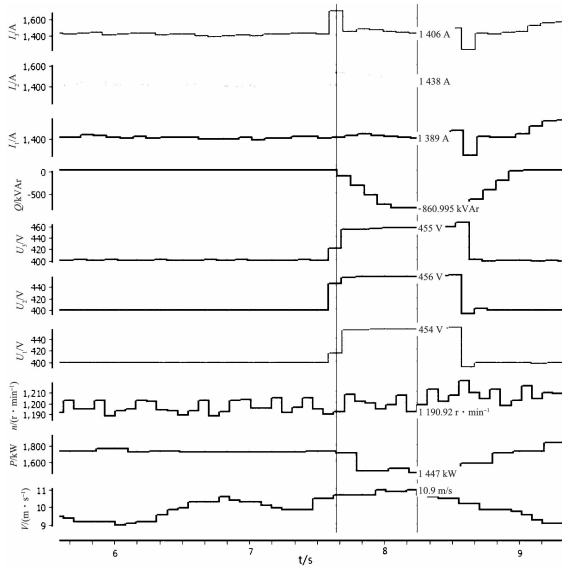


图7 大风工况,对称125%骤升实测结果

从图7中可得,在大风工况下,机组在额定状态下运行,电网电压突然发生125%骤升故障,故障持续1 s后电网电压恢复正常。在电网电压骤升后,风电机组迅速响应向电网提供无功功率,并进入高穿状态,动态无功响应时间小于75 ms。在高穿期间,机组向电网提供持续稳定的感性无功功率支持以拉低电网电压,由于无功支撑作用电网电压拉低至1.14倍,同时,机组有功功率能够正常输出,但是比高穿前有所减小,体现了机组在高穿期间优先保证无功的原则。电网电压恢复后,风电机组经过调整并撤除无功支持,有功功率输出迅速恢复正常。机组在整个高穿期间,无故障运行,顺利通过该工况高穿测试。

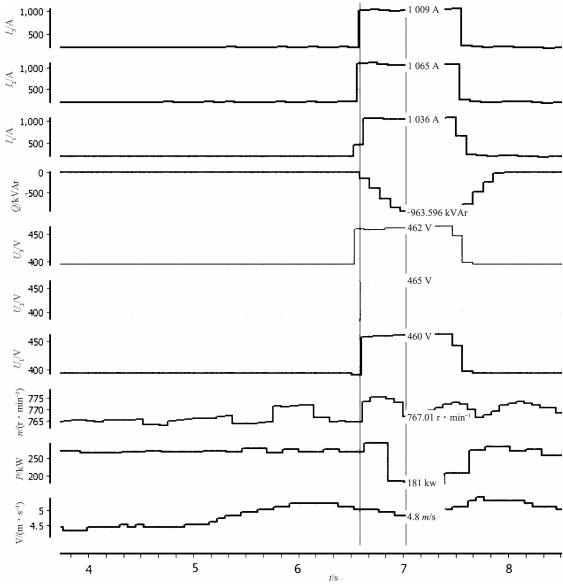


图8 小风工况,对称130%骤升实测结果

从图 8 中可得,机组处于小风工况发电运行状态下,电网电压突然发生 130% 骤升故障,故障持续 1 s 后电网电压恢复正常。在电网电压骤升后,风电机组迅速响应并向电网提供持续稳定的感性无功功率,并进入高穿状态,动态无功响应时间小于 75 ms。在高穿期间,电网电压由于无功支撑作用拉低为 1.15 倍,机组有功功率正常输出,但是比高穿前有所减小,因为机组在高穿期间优先保证无功。电网电压恢复后,风电机组经过调整并撤除无功支持,有功功率输出迅速恢复正常。在整个高穿期间,机组无故障运行,顺利通过该工况高穿测试。

以上工况是电网电压从额定电压开始骤升的高穿测试,除此之外,本研究还进行了先低穿后高穿的连锁故障测试。大风工况下先对称 20% 跌落后 130% 骤升故障实测波形如图 9 所示。

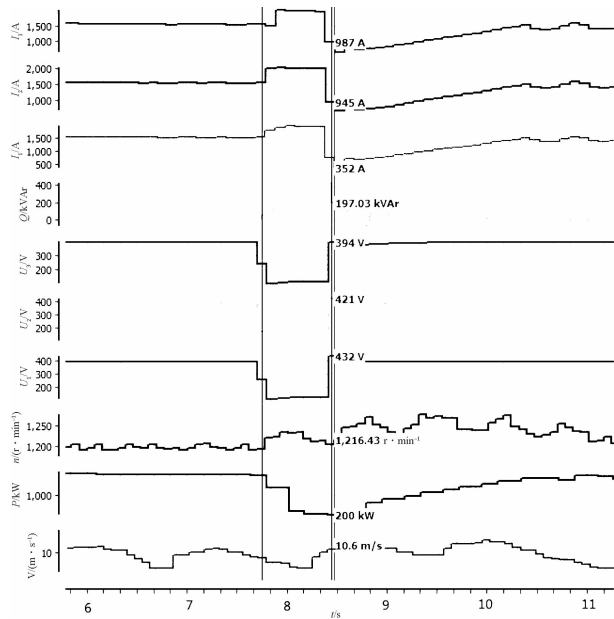


图 9 大风工况,先对称 20% 跌落后 130% 骤升实测结果

从图 9 可得,在大风工况下,机组在额定状态下运行,电网电压先出现 20% 跌落故障,持续 625 ms 后迅速骤升到 130%,持续 100 ms 后电网电压恢复正常,机组快速进入低穿状态并进行容性无功支撑,当低穿结束后电网电压又迅速升高,机组又切换进入高穿状态以进行感性无功支撑。机组从低穿到高穿切换时间短,在整个电网电压先低后高故障过程中,机组稳定运行未报故障,顺利通过该工况测试。

以上测试结果表明,机组不仅通过了从额定电压开始骤升的高穿测试,而且还顺利通过了先低穿后高穿的连锁故障穿越测试,已经完全具备高穿功能。

5 结束语

国内风电场接入电网准则要求风电场必须具有低电压穿越能力,但是对高电压穿越的技术指标还没有明确的规定。本研究分析了电网电压骤升故障会对双馈风电机组产生的危害,同时以 WD100-2000 型双馈风电机组为例,在 Matlab/Simulink 环境下对电网电压骤升故障下双馈风电机组的动态特性进行了仿真研究。仿真结果与现场测试结果都表明,机组顺利通过所有工况的高电压穿越测试,已经完全具备高电压穿越功能,对风电机组高电压穿越技术的研究及完善国内并网规则具有十分重要的意义。

参考文献 (References):

- [1] 力戈,宋新甫,常喜强.直驱永磁风力发电系统低电压穿越改进控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(12):73-78.
- [2] 刘雪菁,朱丹,宋飞,等.风电机组高电压穿越技术研究[J].可再生能源,2013,31(11):34-38.
- [3] 艾斯卡尔,朱永利,唐斌伟.风力发电机组故障穿越问题综述[J].电力系统保护与控制,2013,41(19):147-153.
- [4] 马伟娜,姚万业,白恺.风力发电机组高电压穿越技术研究[J].电网与清洁能源,2014,30(8):71-76.
- [5] 朱永利,艾斯卡尔,刘少宇,等.风力发电机组高电压穿越问题及其基本解决方案[J].华北电力大学学报,2014,41(5):6-11.
- [6] 张健.双馈风力发电系统低/高电压穿越技术研究[D].保定:华北电力大学电气与电子工程学院,2013.
- [7] 曲庭余.双馈风力发电机高电压穿越技术研究[D].合肥:合肥工业大学机械工程学院,2012.
- [8] 贺益康,胡家兵,徐烈.并网双馈异步风力发电机运行控制[M].1版.北京:中国电力出版社,2012.
- [9] 常静,黄家栋,白恺,等.双馈风电机组高电压穿越性能实现方案探讨[J].华北电力技术,2014(6):33-37.
- [10] 张立强,练敏,张婧芳.液力型风力发电机的恒转速控制[J].液压气动与密封,2015(2):37-39.
- [11] 刘京波,朱斯,吴宇辉,等.双馈风电机组高电压穿越控制策略研究[J].华北电力技术,2015(2):29-33.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

周杰,赵豆豆,杨靖,等.双馈风电机组高电压穿越技术研究及测试研究[J].机电工程,2017,34(4):394-398.

ZHOU Jie, ZHAO Dou-dou, YANG Jing, et al. Technical research on high voltage ride through and testing[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(4):394-398.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>