

基于双模控制的永磁直驱型风力发电机组 高电压穿越控制策略的研究

马伟娜¹, 白 恺², 宋 鹏², 刘京波², 姚万业¹, 刘汉民³, 朱 斯³

(1. 华北电力大学, 河北保定 071003; 2. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045;

3. 国网新能源张家口风光储示范电站有限公司, 河北张家口 075000)

The Research on Control Strategy of High Voltage Ride Through for PMSG Based on Dual-modes Control

MA Weina¹, BAI Kai², SONG Peng², LIU Jingbo², YAO Wanye¹, LIU Hanmin³, ZHU Si³

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. North China Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China;

3. Zhangjiakou Wind and Solar Power Energy Demonstration Station CO. LTD, Zhangjiakou 075000, China)

摘 要: 为提高永磁直驱型风力发电机组的高电压穿越能力, 在研究电网电压骤升下风力发电机组运行特性基础上提出一种基于双模控制的永磁直驱型风力发电机组高电压穿越控制策略。以电网电压骤升幅度及直流母线电压的升高程度为依据, 利用选择器进行网侧变流器控制模式的转换, 从而使直驱型风力发电机组具备高电压穿越能力。基于 PSCAD 仿真平台的仿真结果及应用结果表明, 该控制策略不仅可以保证直驱型风力发电机组在电网电压骤升期间不脱网连续运行, 还可以有效提高风力发电机组的无功补偿能力, 有利于电网的安全稳定运行。

关键词: 高电压穿越; 永磁直驱型风力发电机组; 双模控制; PSCAD

Abstract: To improve the ability of the high voltage ride through for wind turbines with the direct-driven permanent magnet synchronous generator, a kind of control strategy of high voltage ride through based on dual-modes control is proposed according to research on the operational characteristics of the wind generators. According to the surge swelling of the grid voltage and the increasing of DC bus voltage, the control mode of converter on the grid side is converted via the mode selector, which makes direct-driven wind generators have such ability as the high voltage ride through. The simulation results by using PSCAD simulation platform and the application results show that this control strategy can not only ensure the wind turbines with direct-driven permanent magnet synchronous generator working continuously during

grid voltage swells, but also can effectively improve the reactive power compensation capabilities of wind generators, which benefit for the operation security and stability of the grid.

Keywords: high voltage ride through; the direct-driven permanent magnet synchronous generator wind turbines; dual-modes control; PSCAD

0 引 言

永磁直驱型风力发电机组具有噪声小、结构简单、运行效率高、后续维护成本低等优点, 在电网中所占的比例逐渐提高^[1]。随着风力发电机组单机容量及风电场规模的不断扩大, 世界各国纷纷出台风电并网准则, 对风力发电机组的并网提出了更严格的要求, 其中除了要求风力发电机组需具备低电压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)能力外, 还要求风力发电机组在电网电压骤升期间具备一定程度的不脱网连续运行能力, 即高电压穿越(High Voltage Ride Through, HVRT)特性^[2-5]。部分高电压穿越曲线如图 1 所示。

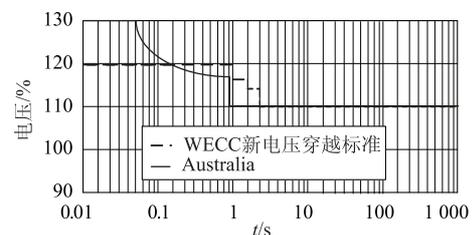


图 1 高电压穿越曲线

基金项目: 国家电网公司项目

目前国内外针对电网电压跌落对直驱风力发电机组的影响以及相应 LVVRT 技术的研究相对成熟^[6-10], 文献 [7-8] 通过在全功率变流器直流侧增加卸荷电阻构成直流侧 Chopper 保护电路, 实现了电网电压跌落时永磁直驱型风力发电机组的低电压穿越运行; 在此基础上, 文献 [9] 通过在电压跌落时控制网侧变流器提供无功电流来稳定电网电压, 进一步提高发电机组的低电压穿越能力; 文献 [10] 通过在电网故障时限制发电机的电磁功率来限制输入到直流侧电容和电网侧变流器的功率实现直流链电压稳定控制, 从而有效实现风力发电机组的低电压穿越运行。但是对于电网电压骤升对直驱型风力发电机组的影响及相应 HVVRT 技术的研究还处于起步阶段, 相关参考文献还比较少见。因此, 研究电网电压骤升对直驱型风力发电机组的影

响, 继而提出一种可行的高电压穿越控制策略就显得十分必要和迫切。

本文在结合文献 [7-9] 中有关风电机组低电压穿越控制方法的基础上, 提出了一种基于双模控制的直驱型风力发电机组高电压穿越控制策略, 并通过仿真结果及现场应用验证了该策略的可行性。

1 电网电压骤升下 PMSG 暂态过程分析

利用 PSCAD/EMTDC 仿真平台建立了适于电力系统暂态稳定分析计算^[11-12]的直驱型风力发电机组机电暂态模型, 其中采用了目前应用最广泛的背靠背全功率变流器, 具体的模型拓扑结构如图 2 所示。

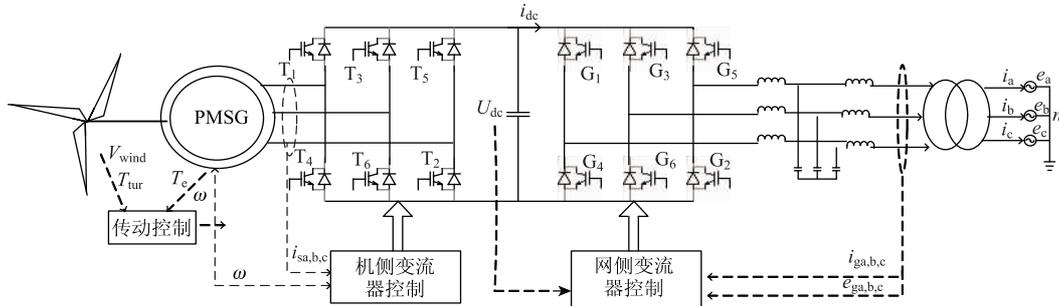


图2 直驱型风力发电机组拓扑结构

由于直驱型风力发电机组通过全功率变流器将永磁发电机与电网隔离, 电网故障不会对发电机产生直接影响, 同时机侧变流器与发电机直接相连, 对机侧变流器的控制实质为对发电机的控制, 则在分析 HVVRT 控制策略时只需将网侧变流器的控制作为主要研究对象^[13-14]。

网侧变流器在同步旋转坐标系下的稳态方程为

$$\begin{aligned} u_{gd} &= -Ri_{gd} + e_d + \omega Li_{gq} \\ u_{gq} &= -Ri_{gq} + e_q - \omega Li_{gd} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: u_{gd} 、 u_{gq} 分别为网侧变流器输出电压矢量的 d、q 轴分量; i_{gd} 、 i_{gq} 分别为网侧变流器输出电流矢量的 d、q 轴分量; e_d 、 e_q 为电网电压矢量的 d、q 轴分量; R 为网侧变流器进线电阻; L 为网侧变流器进线电感; ω 为网侧交变角频率。

由式(1)可得网侧变流器稳态电压空间矢量图, 如图 3 所示。

根据电压空间矢量调制理论, 在不产生过调制情况下, 调制比 m 需满足:

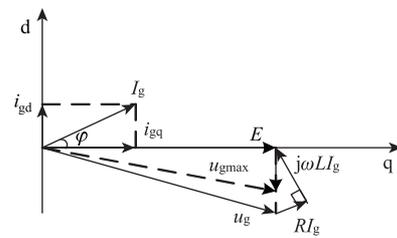


图3 网侧变流器稳态电压空间矢量关系

$$m = \frac{\sqrt{u_{gd}^2 + u_{gq}^2}}{U_{dc}/2} \leq \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

式中: U_{dc} 为直流母线电压。

由图 3 及式(2)联合得出: 若功率因数角 φ 一定, 则其输出电压矢量 u_g 的末端必然落在阻抗三角形的斜边上, 且最大值 u_{gmax} 受到直流侧电压 U_{dc} 的严格限制^[15]。

当采用 q 轴电网电压定向即 q 轴与电网电动势矢量 E_{dq} 重合时, 电网电动势矢量 d 轴分量 $e_d = 0$, $e_q = E$ (E 为电网相电压峰值), 将式(1)代入式(2)

且同时忽略电阻 R 得

$$U_{dc} \geq \sqrt{3} \sqrt{(E - \omega L i_{gd})^2 + (\omega L i_{gq})^2} \quad (3)$$

由此得知：当网侧变流器工作在单位功率因数状态时，直流侧电压 U_{dc} 应不小于电网电压的峰值。则当电网电压骤升时直流母线电压将随之升高，直接威胁变流器的正常运行，因此为保证电网电压骤升期间风力发电机组的正常运行，需采取有效的高电压穿越控制策略。

2 基于双模控制 PMSG 的高电压穿越控制策略

参考直驱型风力发电机组 LVRT 控制策略，发现结合 Chopper 卸荷电路改变网侧工作状态，使风力发电机组快速向电网提供感性无功功率，消耗多余的电网能量，有利于 PMSG 具备高电压穿越运行的能力。

根据文献 [15] 得知电网电压骤升期间风力

发电机组的无功输出主要取决于电网电压骤升幅度，具体逻辑关系可参考德国 E.ON 公司的 HVRT 并网要求：并网点电压骤升至 1.1 倍标称值及以上时，机组需按电网电压每升高 1%、至少提供 2% 额定无功电流的原则优先对故障电网进行补偿，即

$$|i_{gd}^*| \geq 2 \frac{U_{ref} - U_{ref}^*}{U_{ref}^*} |i_N| \quad (4)$$

式中： i_{gd}^* 为无功电流； U_{ref} 为实测电网电压有效值； U_{ref}^* 为电网电压设定有效值； i_N 为额定电流。

同时为了避免网侧变流器过电流，要求有功电流 i_{gq}^* 幅值满足：

$$|i_{gq}^*| \leq \sqrt{i_{max}^2 - i_{gd}^{*2}} \quad (5)$$

式中： i_{max} 为网侧变流器最大允许电流。

基于双模控制的直驱型风力发电机组高电压穿越控制策略如图 4 所示，选择器 Ctrl1、Ctrl2 用以网侧变流器控制模式的转换。

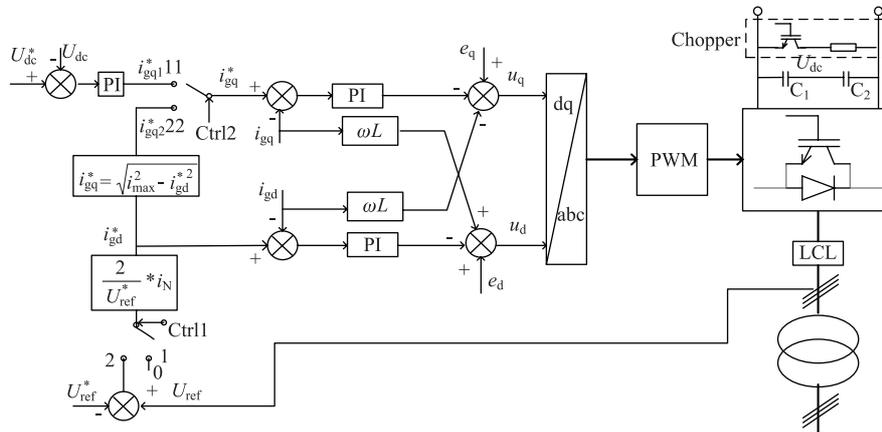


图 4 高电压穿越控制策略

实时监测风力发电机组并网侧电网电压有效值 U_{ref} ，将检测到的值与电网电压设定值 U_{ref}^* 作差，将差值是否超过设定的限值作为 Ctrl1 的输入信号；实时监测有功电流参考值 i_{gq1}^* 与 i_{gq2}^* ，将 i_{gq1}^* 是否大于 i_{gq2}^* 作为 Ctrl2 的输入信号。

电网电压正常情况下，电网电压差值未超过限值，则 Ctrl1 选择模式 1，设定无功电流参考值为 0，同时有功电流 i_{gq1}^* 小于 i_{gq2}^* ，则 Ctrl2 选择器选择模式 11，网侧变流器保持单位功率因数状态，只向电网输送有功功率。

当电网电压骤升时，需改变网侧控制模式，电网电压差值超过限值时，Ctrl1 选择模式 2，利用式(4)计算出参考无功电流值 i_{gd}^* ，使风力发电机

组输出一定感性无功抑制电网电压的升高，同时若监测到有功电流 i_{gq1}^* 大于 i_{gq2}^* ，则 Ctrl2 选择模式 22，将式(5)计算出的数值作为有功电流参考值。与此同时实时监测直流母线电压值，若直流母线电压升高超过限值之后需要及时投入 Chopper 卸荷电路，消耗掉直流侧积累的多余能量，防止直流侧过电压，保证风力发电机组的正常运行。

3 仿真验证

利用 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建 2.5MW 直驱型风力发电机组并网模型进行仿真，具体参数为永磁同步发电机额定功率 2 500kW，并网输出额定电流 2 092A，额定电压 690V，直流母线电容

C_1 、 C_2 均为 $18\ 000\ \mu\text{F}$ ，卸荷电阻为 $0.97\ \Omega$ ，输出滤波电感为 $0.15\ \text{mH}$ ，经升压变压器接入 $35\ \text{kV}$ 电网。风力发电机组并网稳定运行 $1.5\ \text{s}$ 后电网低压侧三相/两相电压分别骤升 130% ，经过 $200\ \text{ms}$ 恢复正常。三相电网电压骤升期间，风力发电机组仿真波形如图 5 所示。

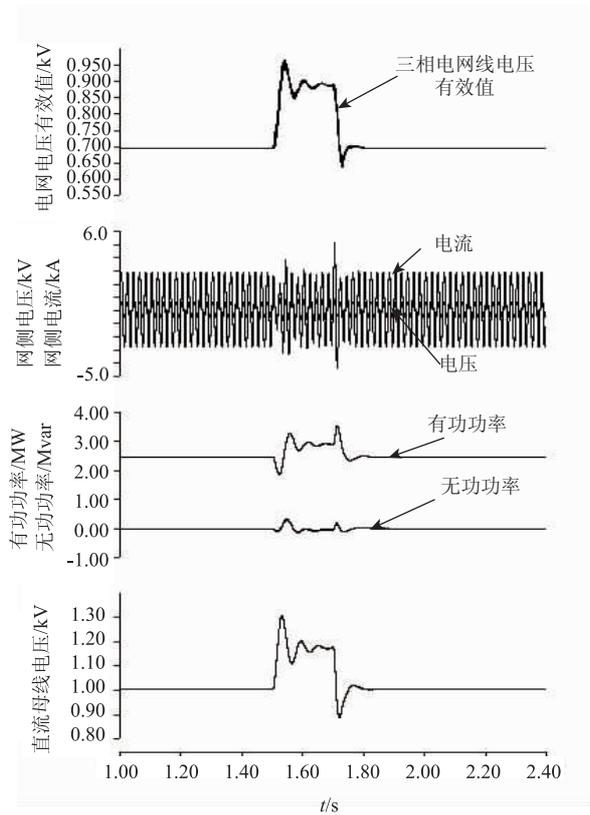


图 5(a) 三相电网电压骤升 130% ，持续 $200\ \text{ms}$ ，未采用高电压穿越控制策略，风力发电机组仿真波形

由图 5 可以看出，电网三相电压值在 $1.5\ \text{s}$ 时由 $690\ \text{V}$ 骤升 130% 至 $897\ \text{V}$ ，并维持 $200\ \text{ms}$ 。图 5 (a)、(b) 分别为未采用高电压穿越控制策略和采用高电压穿越控制策略的风力发电机组仿真波形，对比发现，在电压骤升期间风力发电机组发出 $1.8\ \text{MW}$ 的感性无功功率；有功功率则由原来的骤升至 $3\ \text{MW}$ 改变为降至 $1.2\ \text{MW}$ 并保持，在电网电压骤升结束后恢复至原来的值；直流母线电压值骤升值由原来的瞬间升高至 $1.4\ \text{kV}$ ，随后骤降至 $1.23\ \text{kV}$ 改变为瞬间升高至 $1.24\ \text{kV}$ ，随后骤降至 $1.05\ \text{kV}$ ，维持 $1.1\ \text{kV}$ 至电网电压恢复，在电网电压恢复瞬间小幅波动后恢复到故障前的值保持稳定。

两相电网电压骤升期间，风力发电机组仿真波形如图 6 所示。

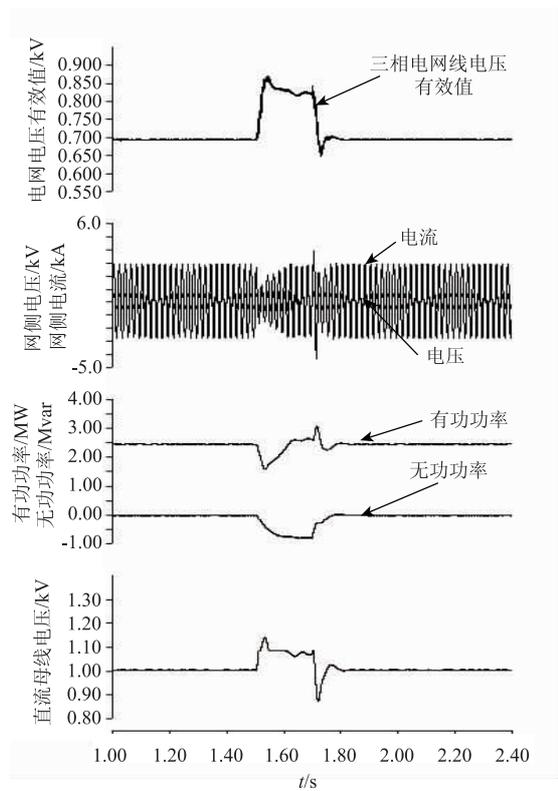


图 5(b) 三相电网电压骤升 130% ，持续 $200\ \text{ms}$ ，采用高电压穿越控制策略，风力发电机组 HVRT 仿真波形

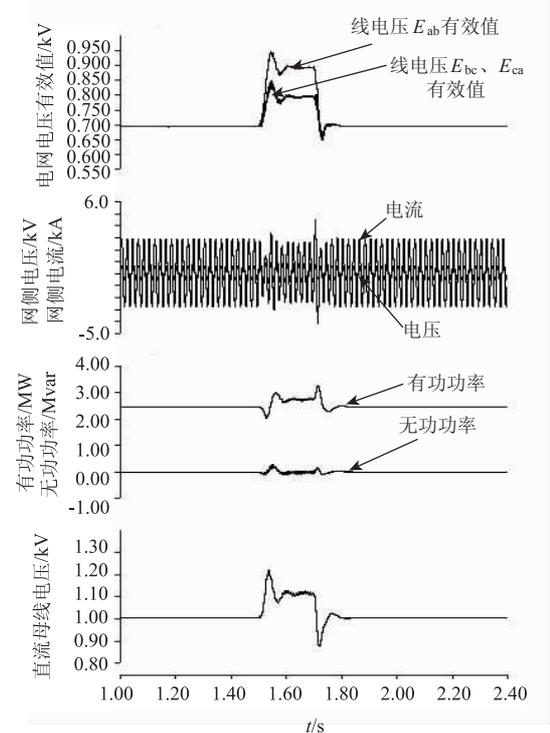


图 6(a) 两相电网电压骤升 130% ，持续 $200\ \text{ms}$ ，未采用高电压穿越控制策略，风力发电机组仿真波形

由图 6 可以看出电网 AB 两相电压值在 $1.5\ \text{s}$ 时由 $690\ \text{V}$ 骤升 130% 至 $897\ \text{V}$ ，并维持 $200\ \text{ms}$ 。图

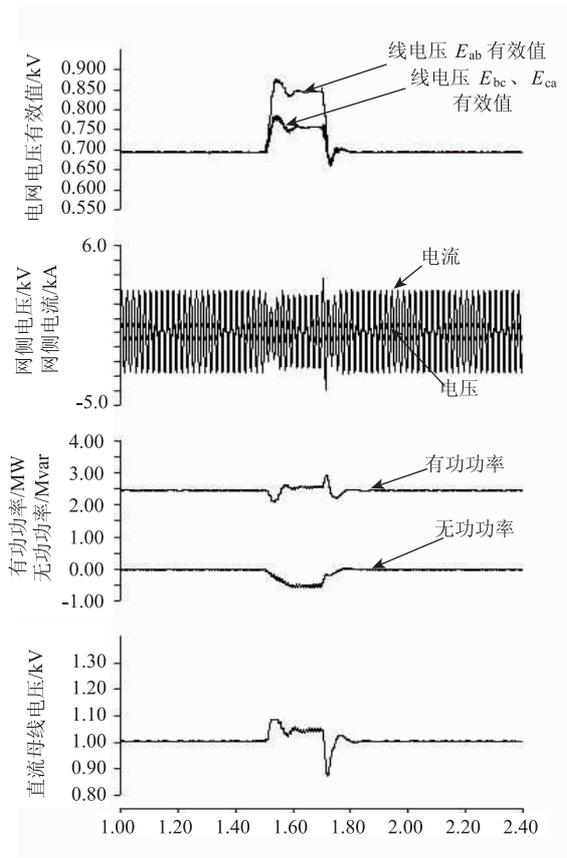


图 6(b) 两相电网电压骤升 130%，持续 200ms，采用高电压穿越控制策略，风力发电机组 HVRT 仿真波形

6(a)、(b)分别为未采用高电压穿越控制策略和采用高电压穿越控制策略的风力发电机组仿真波形，对比发现，在电压骤升期间风力发电机组发出 1.2MW 的感性无功功率；有功功率则由原来的骤升至 2.7MW 改变为降至 1.5MW 并保持，在电网电压骤升结束后恢复至原来的值；直流母线电压值骤升值由原来的瞬间升高至 1.24kV，随后骤降至 1.14kV 改变为瞬间升高至 1.1kV，随后骤降至 1.05kV 并维持至电网电压恢复，在电网电压恢复瞬间小幅波动后恢复到故障前的值保持稳定。

仿真结果表明，在电网电压骤升期间，改变网侧变流器控制模式，依据电网电压骤升幅度发出一定的无功电流，同时结合 Chopper 卸荷电路，消耗直流侧积累的多余能量，可以避免直流母线过电压，保证风力发电机组正常运行，提高风力发电机组高电压穿越的能力。

4 应用验证

通过高电压穿越测试设备产生 690V 电网电压

三相及两相骤升 130% 工况，利用某风电场中 2.5MW 直驱型风电机组进行应用验证。

三相电网电压骤升持续 200ms 时风电机组运行情况如图 7 所示。

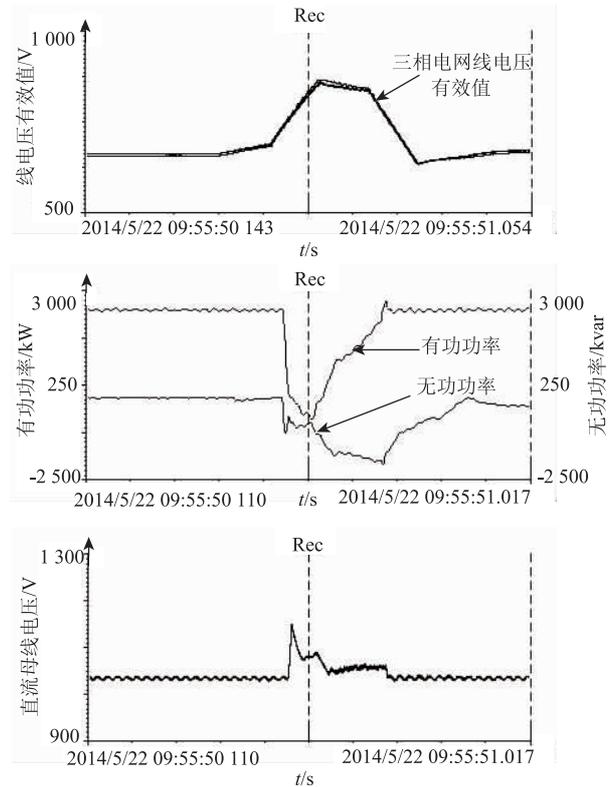


图 7 三相电网电压骤升 130%，持续 200ms，风力发电机组 HVRT 试验波形

由图 7 可以看出电网三相电压值由 690V 骤升 130% 并维持 200ms，在此期间风力发电机组发出 1.6MW 的感性无功功率，有功功率则由 2.5MW 降至 0.0628MW，在电网电压骤升结束后恢复至原来的值；直流母线电压值在骤升瞬间升高至 1.15kV，随后骤降至 1.08kV，在电网电压恢复后恢复到故障前的值保持稳定。

AB 两相电网电压骤升持续 200ms 时风电机组运行情况如图 8 所示。

由图 8 可以看出电网 AB 两相电压值由 690V 骤升 130% 并维持 200ms，在此期间风力发电机组发出 1.36MW 的感性无功功率，有功功率则由 2.45MW 降至 0.312MW，在电网电压骤升结束后恢复至原来的值；直流母线电压值在骤升瞬间升高至 1.158kV，随后骤降至 1.038kV，在电网电压恢复后恢复到故障前的值保持稳定。

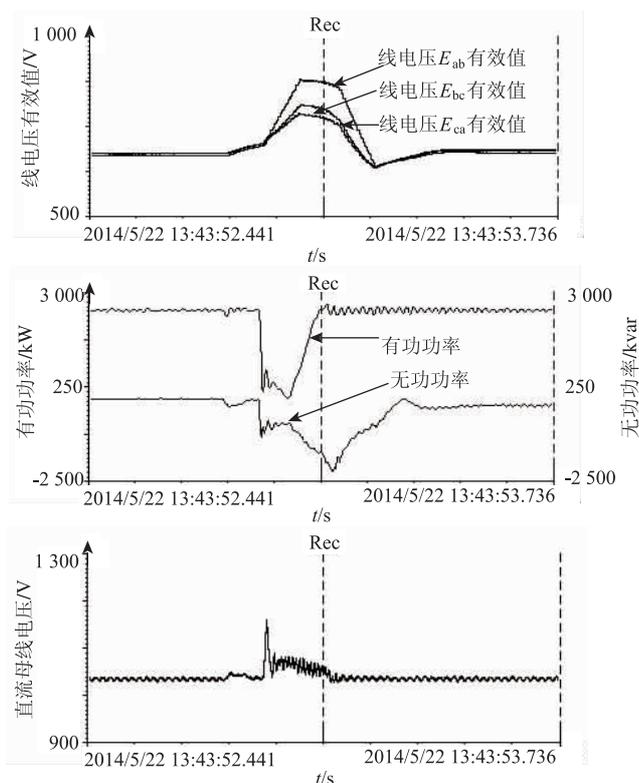


图8 两相电网电压骤升130%，持续200ms，风力发电机组 HVRT 试验波形

应用试验表明，本文提出的基于双模控制的直驱型风力发电机组高电压穿越控制策略在现场应用中具有可行性。

5 结 语

本文提出了一种基于双模控制的直驱型风力发电机组高电压穿越控制策略，通过判断电网电压骤升幅度及直流母线电压的升高程度，利用模式选择器进行有功电流及无功电流参考值的设定，提高直驱型风力发电机组的高电压穿越能力。本文所采用的控制策略易与现有的低电压穿越控制策略相结合，为基于直驱型风力发电机组高低电压穿越能力的研究提供了一定的解决思路。

参 考 文 献

- [1] 高峰, 周孝信, 等. 直驱式风电机组机电暂态建模及仿真 [J]. 电网技术, 2011(11): 29-34.
- [2] 戴慧珠, 迟永宁. 国内外风电并网标准比较研究 [J]. 中国电力, 2012, 10: 1-6+11.
- [3] The Technical Basis for the New WECC Voltage Ride-Through (VRT) Standard [S]. Approved by

WECC Board April 2007.

- [4] Australian Energy Market Commission. National electricity rules [R/OL]. 2008.
- [5] E. ON Netz. Grid code for high and extra high voltage [S]. Bayreuth, Germany: E. ON Netz Gwbn, 2006.
- [6] 张兴, 张龙云, 杨淑英, 等. 风力发电低电压穿越技术综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(2): 1-8.
- [7] 胡书举, 李建林, 许洪华. 直驱风电系统变流器建模和跌落特性仿真 [J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 949-954.
- [8] 胡书举, 李建林, 许洪华. 直驱式 VSCF 风电系统直流侧 Crowbar 电路的仿真分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(3): 118-123.
- [9] 李建林, 胡书举, 孔德国, 等. 全功率变流器永磁直驱风电系统低电压穿越特性研究 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 92-95.
- [10] 姚骏, 廖勇, 庄凯. 电网故障时永磁直驱风电机组的低电压穿越控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 91-96.
- [11] 刘辉, 闵勇. 电力系统暂态稳定域边界二维特征不变流形计算 [J]. 电网技术, 2009, 33(1): 5-10.
- [12] 叶圣永, 王晓茹, 刘志刚, 等. 电力系统暂态稳定概率评估方法 [J]. 电网技术, 2009, 33(6): 19-23.
- [13] Morren J, Pierik J T G, De Haan S W H. Voltage dip ride-through control of direct-drive wind turbines [C] // 39th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). 2004
- [14] Morinaga Shuta, Izumi, Yuya, et al. Output power control of a PMSG based wind turbine in strong wind conditions [C] // 2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), May 28-31, 2013, Taipei, Taiwan.
- [15] 徐海亮, 章玮, 陈建生, 等. 考虑动态无功支持的双馈风电机组高电压穿越控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 112-119+16.

收稿日期: 2014-07-30

作者简介:

马伟娜(1988—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为风力发电技术, E-mail: maweina2008@yeah.net;

白 恺(1971—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网与新能源发电, E-mail: baikai1234@263.net;

宋 鹏(1982—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网与新能源发电, E-mail: 18601121118@163.com.

(责任编辑: 林海文)