

电网电压不对称骤升下直驱式 风力发电系统的高电压穿越研究

周士琼¹ 王倩¹ 陈隆¹ 吕潇¹ 刘东霖¹ 倪亚玲²

(1. 西南交通大学电气工程学院 四川 成都 610031;

2. 电子科技大学机械电子工程学院 四川 成都 610054)

摘要:为实现直驱式风力发电系统的高电压穿越,提出一种在电网电压不平衡骤升工况下,基于网侧变流器的双重控制策略。当电网电压骤升超过额定电压的设定倍数时,网侧变流器增加无功输出,直流母线电压泄放电路进行电能释放,并且触发正负序电流控制,有效地抑制由于电网电动势不平衡造成的直流母线电压波动。仿真结果表明,所提控制策略能够保证在电网发生不对称骤升故障期间直驱式风力发电系统不脱网运行。

关键词:直驱式风力发电机组;不对称骤升;正负序分离;高电压穿越

Abstract: A dual control strategy is proposed based on grid-side converter to achieve the high voltage ride through of direct-driven wind power generation system under unbalanced grid voltage swell. When the grid voltage is higher than the set multiple of rated voltage, the grid-side converter increases the reactive power output, the DC bus voltage discharge circuit releases energy and triggers the positive and negative sequence current control, which effectively suppresses the fluctuation of DC bus voltage due to the unbalanced electromotive force of the grid. Simulation results show that the proposed control strategy can guarantee the direct-driven wind power generation system is not in off-grid operation during the unsymmetrical grid voltage swell.

Key words: direct-driven wind turbine generators; unsymmetrical voltage swell; positive and negative sequence detection; high voltage ride through (HVRT)

中图分类号: TM613 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)04-0062-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.04.012

近年来,随着风力发电机组在电网中所占比例的快速增加,同时,因为风电系统的波动性的特点,给电力系统带了很多问题,如电压波动、功率不平衡、谐波含量大等现象,都给电力系统的稳定运行埋下隐患,所以电网对风力发电系统的并网要求不断提高,不仅要求风力发电机组能够输出稳定的有功、无功功率,还要求其具备故障穿越的能力^[1]。在实际运行的风电场中,很多因素可能导致电网电压的骤升,例如,单相对地故障、风电场负载的突然切除、电网故障恢复后未及时切除风电场的无功补偿装置或未及时调整可调变压器的分接头等等。目前,针对并网风电机组的高电压穿越运行与控制,国际上某些国家已制定了相应的运行规范。以澳大利亚制定的并网风力发电系统的高电压穿越准则为例^[1],其中一点要求为:当电网电压骤升至电网额定电压的 130% 时,风电机组应至少维持 60 ms 不脱网,并能在故障期间为电网提供足够大的故障恢复电流。

目前,因高电压引起的风机脱网运行现象已得到国内外学者的关注,针对风力发电系统的高电压穿越

作出了初步研究。文献[2]提出一种基于串联网侧变换器的双馈风力发电系统 HVRT 运行控制策略。文献[3]提出了对称电压骤升故障下 DFIG 转子侧有源阻尼控制策略。文献[4-5]分别提出在转子励磁控制系统中采用变阻尼和虚拟阻抗的控制策略,提高了系统的高电压穿越性能。文献[6]则提出了通过转子侧和网侧变流器的无功动态分配原则,合理地控制和分配无功,实现风电系统的高电压穿越。文献[7]提出了在并网点增加无功补偿器,来实现双馈风力发电系统高电压穿越。上述文献所提出的一些风力发电机组的控制策略,在一定程度上可以实现高电压穿越,但都是在电压对称骤升的情况下并未考虑到不平衡电压工况下的高电压穿越,以及有效抑制直流母线电压的波动。

对此,首先对电网电压骤升下直驱式风力发电机组的网侧变流器电流电磁暂态过程进行分析,在此基础上提出基于电网电流正负序控制策略。仿真分析表明,所提控制策略能够实现风电系统的高电压穿越,保证系统的稳定运行。

1 电网电压骤升下网侧变流器暂态分析

为消除变流器直流母线电压波动,需要控制直流侧的功率波动。不对称故障下,对于双馈风电机组,变流器直流侧波动功率更多来自于机侧;而对于直驱式风电机组,波动功率直接来自于网侧。图1为直驱式风电机组网侧系统示意图。

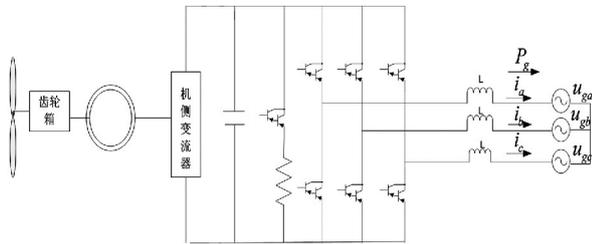


图1 直驱式风电机组网侧系统示意图

网侧变流器和电网的传输功率为

$$P_g = \frac{3}{2} \text{Re} \{ \vec{v}_g \cdot \vec{i}_g^* \} \quad (1)$$

$$Q_g = \frac{3}{2} \text{Im} \{ \vec{v}_g \cdot \vec{i}_g^* \} \quad (2)$$

式中: P_g 和 Q_g 分别为变换器的有功和无功功率; \vec{v}_g 和 \vec{i}_g 分别为变换器的电压和电流空间矢量。

功率振荡可通过对电压和电流的正负序分解分析得出:

$$\vec{V}_g = V_1 e^{j\omega_g t} + V_2 e^{-j\omega_g t} = (v_{d1} + jv_{q1}) e^{j\omega_g t} + (v_{d2} + jv_{q2}) e^{-j\omega_g t}$$

$$\vec{i}_g = I_1 e^{j\omega_g t} + I_2 e^{-j\omega_g t} = (i_{d1} + ji_{q1}) e^{j\omega_g t} + (i_{d2} + ji_{q2}) e^{-j\omega_g t}$$

式中 ω_g 为电网频率,下标1和2分别指正序和负序。

将上述分解式带入功率表达,可得

$$P = P_0 + P_{\cos} \cos(2\omega_g t) + P_{\sin} \sin(2\omega_g t)$$

$$Q = Q_0 + Q_{\cos} \cos(2\omega_g t) + Q_{\sin} \sin(2\omega_g t)$$

式中系数 $P_0, P_{\cos}, P_{\sin}, Q_0, Q_{\cos}, Q_{\sin}$ 由如下矩阵给出^[8]。

$$\begin{pmatrix} P_0 \\ Q_0 \\ P_{\cos} \\ P_{\sin} \\ Q_{\cos} \\ Q_{\sin} \end{pmatrix} = \frac{3}{2} \begin{pmatrix} v_{d1} & v_{q1} & v_{d2} & v_{q2} \\ v_{q1} & -v_{d1} & v_{q2} & -v_{d2} \\ v_{d2} & v_{q2} & v_{d1} & v_{q1} \\ v_{q2} & -v_{d2} & -v_{q1} & v_{d1} \\ v_{q2} & -v_{q2} & v_{q1} & -v_{d1} \\ -v_{d2} & -v_{q2} & v_{d1} & v_{q1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{d2} \\ i_{q2} \end{pmatrix}$$

如果电网电压平衡,不存在负序分量,即 v_{d2}, v_{q2}, v_{d1} 和 i_{q2} 为0。因此,系数 $P_{\cos}, P_{\sin}, Q_{\cos}, Q_{\sin}$ 为0,功率不会振荡。

然而此时电压不平衡时,这些系数不等于0,此时功率随时间变化。有功功率从直流母线传输到电网,从而决定直流母线电压的水平。因此,若 P_g 发

生变化,直流母线电压也会发生脉动,且脉动以2倍电网频率出现,威胁着变流器稳定安全地运行,严重时将会导致直驱式风力发电机组脱网运行。

综上所述,当电网电压不对称骤升时,由于电压电流中负序分量的存在,网侧逆变器输出的有功功率、无功功率中均含有一定的2倍工频波动。因此,要实现直驱式风电机组的高电压穿越,保持直流侧电压恒定,就要有效地抑制有功功率的波动。

2 不对称电网电压骤升情况下网侧变流器的控制策略

2.1 网侧变流器双重控制策略

为保证正负序分量的精确控制,有必要对其独立调节。用2个新控制环代替原始控制环,一个工作于正序同步坐标系,另一个工作于反向旋转的坐标系,即所谓的双重控制^[9]。

如图2给出了双重控制的典型框图。图中有2个电流环:一个控制正序电流;一个控制负序电流。进行电流控制之前,须将测量电流分解成正负序分量。同时,该方案还需要根据所需要的功率和电网电压计算正负序电流指令值。

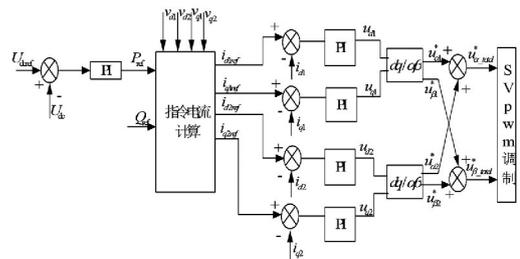


图2 双重控制框图

运用电网正负序双电流环的矢量控制策略,在电网发生不对称故障时,监测和计算网侧电压、并网电流的正负序分量,电网电流在正负同步旋转坐标系下进行解耦,得到正、负序电流分量,经过PI调节器输出得到控制正负序电流的调制电压,将两者叠加并进行调制,完成正负序电流控制,有效地抑制直流母线电压及并网有功功率的波动。通过分别控制正负序电流使其跟踪正负序电流的参考指令值,消除输出到电网有功功率的2倍工频波动量,维持直流侧电压稳定;同时,通过发出无功给定值能够调节直驱式风电机组并网系统的功率因数,给电网提供无功支持^[10-11]。

2.2 不对称故障时并网逆变器的控制目标优化

电网不对称骤升时,需要对正序电流、负序电流分别控制,因此对正负序电流指令值的选取非常关键^[12]。不对称骤升时高电压穿越控制策略的目标主要有以下 3 个:

- 1) 消除直流电压波动和逆变器有功功率波动,即 $P_{\cos} = 0, P_{\sin} = 0$;
- 2) 消除无功功率波动,即 $Q_{\cos} = 0, Q_{\sin} = 0$;
- 3) 消除并网电流中的负序成分,即 $i_{d1}^n = i_{q1}^n = 0$ 。

采用电网正序基波电压定向时有 $v_{q1} = 0$ 。考虑逆变器输出功率中的二次谐波分量,有:

$$\begin{pmatrix} P_{\cos} \\ P_{\sin} \\ Q_{\cos} \\ Q_{\sin} \end{pmatrix} = \frac{3}{2} \begin{pmatrix} v_{d2} & v_{q2} & v_{d1} & v_{q1} \\ v_{q2} & -v_{d2} & -v_{q1} & v_{d1} \\ v_{q2} & -v_{q2} & v_{q1} & -v_{d1} \\ -v_{d2} & -v_{q2} & v_{d1} & v_{q1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{d2} \\ i_{q2} \end{pmatrix}$$

由于行列式:

$$\begin{vmatrix} v_{d2} & v_{q2} & v_{d1} & 0 \\ v_{q2} & -v_{d2} & 0 & v_{d1} \\ v_{q2} & -v_{q2} & 0 & -v_{d1} \\ -v_{d2} & -v_{q2} & v_{d1} & 0 \end{vmatrix} = -4(v_{d1})^2 [(v_{d2})^2 + (v_{q2})^2] \neq 0 \quad (3)$$

故,使式(3)等号右边为 0 的解只有一个,即 $[i_{d1}^n \ i_{q1}^n \ i_{d2}^n \ i_{q2}^n]^T = 0$,而这种情况对于实际的直驱式风力发电并网系统来说显然是不可能的,故上述 3 个控制目标无法同时实现。因此,只能对上述 3 个控制目标进行优化,选择最适合电网故障时风电机组并网系统的一个作为高电压穿越控制的目标。

由前述可知,有功功率的 2 倍工频波动是导致并网逆变器无法稳定运行的直接原因,因此所提的控制策略将以消除输出有功功率的 2 倍工频波动为目标^[13]。

为保持直流电压恒定,系数 P_{\cos} 、 P_{\sin} 必须为 0。对矩阵求逆,获得达到此目标所需的电流为

$$\begin{pmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{d2} \\ i_{q2} \end{pmatrix} = \frac{P_0}{D} \cdot \frac{2}{3} \begin{pmatrix} v_{d1} \\ v_{q1} \\ -v_{d2} \\ -v_{q2} \end{pmatrix} + \frac{Q_0}{R} \cdot \frac{2}{3} \begin{pmatrix} v_{d1} \\ -v_{q1} \\ v_{d2} \\ -v_{q2} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中 $D = (v_{d1}^2 + v_{q1}^2) - (v_{d2}^2 + v_{q2}^2)$

$R = (v_{d1}^2 + v_{q1}^2) + (v_{d2}^2 + v_{q2}^2)$

网侧变换器采用式(4)计算出的电流控制指令,则传输至电网的功率将恒定且等于 P_0 。无功功率的平均值也可以通过调节进行 Q_0 控制,但会存在附加的交变功率。

3 风力发电机组 HVRT 的实现

图 3 给出了直驱式风力发电机组的 HVRT 控制框图。当电网电压低于其正常浮动上限(这里设定为 1.1 倍标称值)时,按照网侧变流器稳定直流母线电压;一旦检测到电网电压骤升至 1.1 倍标称值及以上时,变流器进入高电压穿越控制状态,网侧变流器通过改变无功电流增加无功输出,触发正负序电流控制。然后通过提高变流器无功电流来调节电网电压。电网电压、变流器交流测电压、电抗器电压三者形成矢量三角形。当电网电压升高时,由于变流器交流测电压不能跳变,需要调节电抗器电流增大其电压,达到新的平衡状态,实现了通过改变变流器无功电流来调节电网电压。

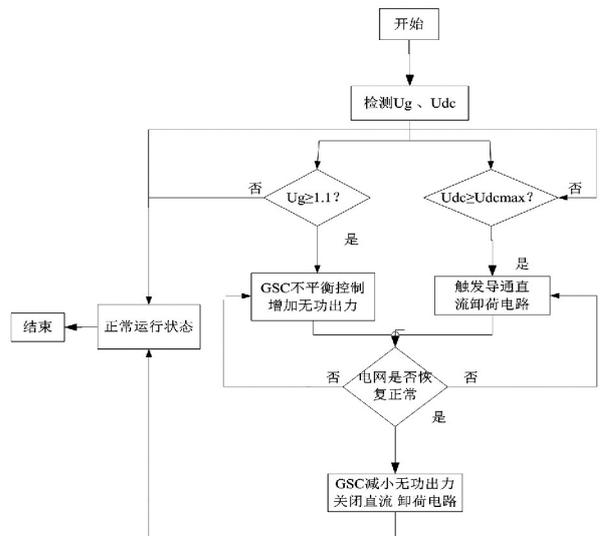


图 3 直驱式风电机组 HVRT 控制流程

同时为抑制电压骤变瞬间可能出现的母线电压泵升,直流母线上并联一直流卸荷 Chopper 电路,当直流母线电压升高至设定触发开关器件 IGBT 导通的限制时,触发其导通,卸荷 Chopper 电路开始工作,从而确保直流环节的安全^[14]。

通过网侧变流器和直流母线卸荷 Chopper 电路的配合,电网电压很快恢复正常。当电网电压恢复到正常范围内时,网侧变流器恢复正常控制,减小无功输出,进行网侧稳压控制。最终能够实现直驱式风电机组高电压穿越的暂态过渡过程。

4 仿真分析

在 Matlab/Simulink 平台上构建了 1 MW 直驱式风力发电系统仿真模型,电网频率为 50 Hz,直流

侧母线恒定电压为 560 V,来验证所提控制策略的有效性。仿真时间为 1 s,系统在 0.4 s 时发生电压不对称骤升故障,故障持续时间 100 ms,0.5 s 时故障消失。仿真条件设定为风电场母线电压不对称升高为其额定值的 1.3 倍。

采用电网正常条件下直驱式风力发电系统的传统矢量控制策略作为电网发生不对称高电压故障时直驱式风力发电系统的控制策略,与所提出的改进控制策略进行对比分析。电网电压发生不对称骤升时,传统方式下直驱式风力发电系统 HVRT 仿真结果如图 4~图 9 所示。

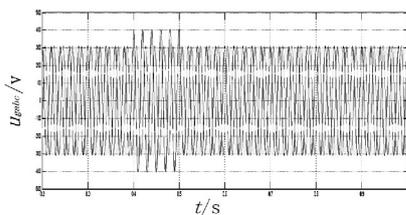


图 4 电网电压波形

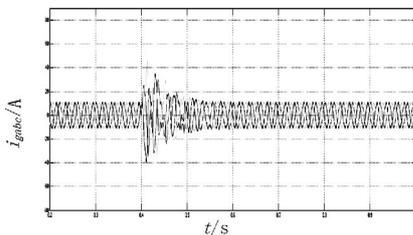


图 5 网侧变流器交流侧电流波形

从图 4 可以看出,电网电压发生不对称骤升时,由于电网电压负序分量的作用,三相电流出现了较大的畸变;对三相电流进行谐波分析,其中含有大量的谐波,同时三相电流的基波幅值出现明显的不平衡,严重影响风电机组输出电能质量。由于三相电流和三相电压中负序成分的作用,逆变器输出的有功电流和无功电流均会出现 2 倍工频的波动。从图 6~图 8 中可以观察到,直流侧母线电压从 0.4 s 开始出现 2 倍工频的波动。逆变器输出电流的 dq 分量在稳态时均为直流量,0.4 s 后,逆变器输出电流 dq 轴分量均出现了二次波动。从图 7 得出,直驱式风电机组的并网逆变器输出到电网的有功功率、无功功率也以 2 倍工频波动,影响直驱式风力发电并网系统的稳定运行,如果风机并网点电压骤升越高,风机并网系统受其影响越大。因此,为保证直驱式风机并网系统在电网发生不对称电网电压骤升故障时不脱离电网,提高其高电压穿越能力,须对其网侧变流器的控制策略进行改进。

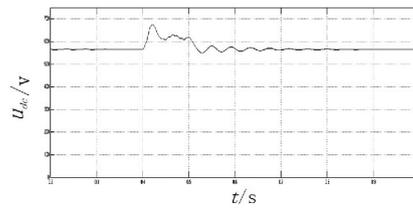


图 6 直流母线电压波形

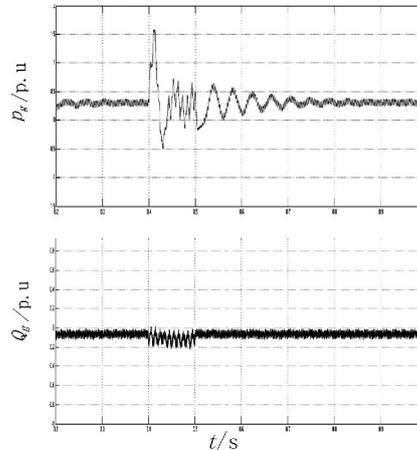


图 7 变流器有功功率和无功功率波形

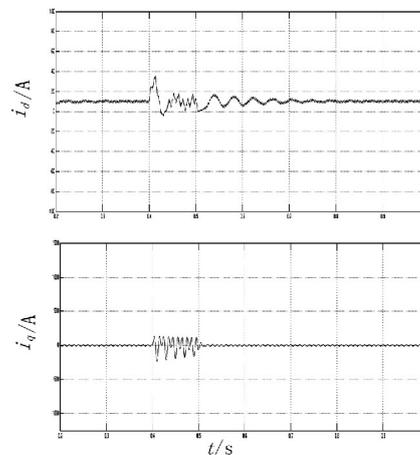


图 8 输出电流 d-q 轴分量波形

如图 9~图 11 所示,则给出了所提的采用正负序双电流环矢量控制策略(双重控制策略)结合直流侧能量泄放回路的直驱式风力发电系统高电压穿越运行的仿真图。其控制目标是在故障时消除输出有功功率的 2 倍工频波动。在 0.4 s~0.5 s 期间,如图 9,直流母线电压的波动得到了明显的抑制;在图 10 中,并网逆变器的输出三相电流出现不平衡。但从图 11 可以看出,网侧变流器的输出有功功率基本恒定,基本上没有出现 2 倍频率的波动,但这就导致了输出电流的不平衡以及输出无功功率以 2 倍频波动。然而,这样的故障过程是短暂的,可以忽略电流质量问题,必须保证并网变流器稳定,抑制并网有功功率以及直流母线电压的波动。

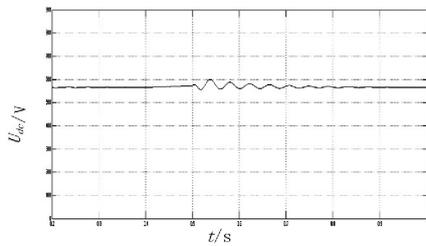


图9 直流母线电压波形

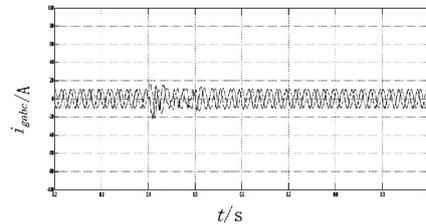


图10 网侧变流器交流侧电流波形

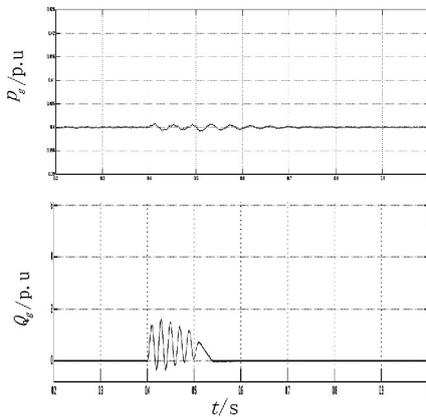


图11 变流器有功功率和无功功率波形

由仿真结果可以看出,采用电网正负序双电流环矢量控制策略,对并网电流的正负序分量分别控制后,当电网突然发生不对称故障时,直驱式发电系统的网侧变流器输出到电网的有功功率、无功功率、并网点三相电流及直流侧电压经过短暂的调节后进入稳态运行,并网有功功率的2倍工频分量被有效抑制,而控制目标中无法消除无功功率的2倍工频分量。直流母线电压经短暂的调节后能够运行于原来的稳态值,其2倍工频波动也能够被有效抑制,保证了整个系统的稳定运行。

5 结论

针对直驱式风力发电机组在不平衡电压骤升情况下,实现高电压穿越,通过对网侧变流器的电流电磁暂态分析,提出了一种基于正负序双电流环矢量控制策略。有效降低了当电网电压骤升时,系统故障停机,烧坏功率器件的概率。通过仿真研究表明,所提出的改进控制策略,与实际理论相符合,可以实

现直驱式风力发电机组的高电压穿越,为提高电压骤升故障下大型风电系统及其所并电网的安全稳定运行能力奠定基础。

参考文献

- [1] Mohseni M, Islam S M. Transient Control of DFIG - based Wind Power Plants in Compliance with the Australian Grid Code [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2012, 27(6): 2813 - 2824.
- [2] 李俊杰, 蒋昆, 刘国平等. 采用串联网侧变换器的双馈风电系统高电压穿越控制策略 [J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3037 - 3044.
- [3] 谢震, 张兴, 宋海华, 等. 电网电压骤升故障下双馈风力发电机变阻尼控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 39 - 46.
- [4] 谢震, 张兴, 杨淑英, 等. 基于虚拟阻抗的双馈风力发电机高电压穿越控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 16 - 23.
- [5] 谢震, 张兴, 杨淑英, 等. 电网电压不对称骤升下双馈风力发电机改进控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 109 - 118.
- [6] 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.
- [7] Wessels C, Fuchs F W. High Voltage Ride Through With FACTS for DFIG Based Wind Turbines [C]. Proceedings of 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications. Barcelona, Spain: IEEE, 2009: 1 - 10.
- [8] 王晓兰, 董振华, 梁琛. 不对称故障下光伏发电系统的电压稳定控制策略 [J]. 电气传动, 2014, 44(12): 44 - 48.
- [9] L. Xu, Y. Wang. Dynamic Modeling and Control of DFIG - based Wind Turbines under Unbalanced Network Conditions [J]. IEEE Trans. Power Systems, 2007, 22(1): 314 - 323.
- [10] 高扬, 于会群, 张浩, 等. 基于定子磁链定向的双馈风力发电解耦控制研究 [J]. 电气传动, 2014, 44(12): 17 - 20.
- [11] 邬冬临, 余岳, 徐凤星, 等. 双馈风力发电机机侧变频器控制策略的研究 [J]. 电气传动, 2013, 43(5): 66 - 69.
- [12] 柏浩峰. 光伏并网逆变器低电压穿越技术研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [13] 耿华, 刘淳, 张兴, 等. 新能源并网发电系统的低电压穿越 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [14] 李东东, 叶辰升. 基于改进风力发电机组下的低电压穿越控制策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 34 - 40.

(收稿日期: 2016 - 03 - 30)