

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.03.001

基于转子基波电压协同输出控制的双馈变流器高电压穿越策略

蒋耀生¹, 刘连根¹, 李圣清², 徐凤星¹

(1. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001; 2. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 为了解决电网电压深度不对称骤升时, 机侧变流器功率不稳定以及直流母线脉动问题, 提出一种基于转子基波电压协同输出控制的双馈变流器高电压穿越方法。当电网电压不对称升高时, 转子侧变流器只输出转子电压基波分量, 控制转子变流器输出有功功率基本为零, 同时网侧变流器把直流母线的脉动功率送至电网。试验结果表明, 该控制方案不仅可以保证在电网电压不对称升高期间双馈风电机组不脱网运行, 还能向电网提供一定的感性无功功率, 同时该方法不需要使用直流母线电压斩波电路, 节省了成本。

关键词: 双馈变流器; 高电压穿越; 转子基波电压协同控制; 无直流斩波

中图分类号: TM315

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)03-0001-07

Research on the High Voltage Ride Through the Method for the Doubly-Fed Converter Based on the Coordinated Output Control of Rotor Fundamental Wave Voltage

JIANG Yaosheng¹, LIU Liangen¹, LI Shengqing², XU Fengxing¹

(1. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412001, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the problems of the asymmetric rise in the voltage depth of power grid, the instability of the power in the side converter, as well as the pulsation in DC bus, a proposal has thus been proposed of the high voltage ride through the method for the doubly-fed converter based on the coordinated output of rotor fundamental wave voltage. When the voltage asymmetry increases, there is only an output of the fundamental components of rotor voltage from the rotor side converter, with the output power of the control rotor converter being basically zero, and the pulsating power of the DC bus simultaneously transported to the power grid by the grid side converter. The experimental results show that the proposed control scheme can not only ensure that the doubly-fed wind turbine does not take off the grid with the rise of asymmetry grid voltage, but also provide a certain inductive reactive power to the power grid. Meanwhile, the cost can be saved due to the fact that the proposed method does not need the chopper circuit of the DC bus voltage.

Keywords: double-fed converter; high voltage ride through technology; coordinated output control of rotor fundamental wave voltage; chopped wave without DC

1 研究背景

风力发电作为一种无污染、可再生资源的环保型

发电方式, 是最具发展潜力的可再生能源技术之一。

但是随着风力发电机组数量的增多, 加上双馈风电机

收稿日期: 2018-04-03

作者简介: 蒋耀生(1963-), 男, 湖南醴陵人, 中车株洲电力机车研究所有限公司高级工程师, 主要从事大功率风电变流器系统方面的研究, E-mail: jiangys@teg.cn

组本身对电网的适应性比较差,当电网电压升高时,发电机主磁通的时间常数比较大,导致定子磁链不能突变。同时,由于大容量风电机组的机械惯性较大,发电机转速变化较小,即发电机的反电动势不会发生变化,在定子绕组的电阻和漏感之间的瞬间电压差会导致定子电流出现很大的冲击电流。由双馈电机的电磁耦合关系,转子侧变流器的电流也会出现过流现象,为了保护变流器和发电机,变流器立刻封锁脉冲、故障停机脱网。若由于电网电压的升高导致大面积的风电场解列,会使电力系统有功和无功出现不平衡,可能使系统故障进一步加剧,以致系统局部甚至全面瘫痪,危害电网上的其他设备,甚至造成用户损失。典型案例:2011年甘肃酒泉风电场将近55%的风电机组脱网是因为电网电压过高保护脱网。为了尽量减少风电机组脱网对电力系统造成的影响,电网安全运行准则要求双馈型风力发电机组必须具有高电压穿越(high voltage ride through, HVRT)功能。

目前,欧美国家,如美国、西班牙、丹麦等^[1],对风电机组的高电压穿越标准已有初步规范。中国电力科学研究院也出台了相应的标准初稿^[2],其给出了风电机组在并网点电压骤升至1.3倍标称值时,不脱网运行300 ms等条款。与相对成熟的低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)技术不同,高电压穿越控制技术在国内外很少报道,Xu Hailiang等^[3]在风电机组系统中加入谐振控制器,以便网压轻度不对称升高时或转子负序分量不大时,能够跟踪指令值。但是在网压深度不对称升高时,由于转子电流负序分量过大,谐振控制器不能及时跟踪指令值,导致该方法失效。M. Mohseni等^[4]提出当电网对称升高时,采用滞环控制器替代PI调节器,可提高系统动态响应速度。文献[5-6]与LVRT的实现方案基本一致,即在电网电压骤升期间,采用静止同步无功补偿器、动态电压恢复器等装置补偿机端电压到正常值,但这会使系统成本大大增加。文献[7-8]分别提出了基于变阻尼和虚拟阻抗的转子励磁控制,所提方法均缩短了电网电压骤升时的转子震荡过程,一定程度上提高了系统的高电压穿越性能,但没有考虑风电机组的动态无功功率支持能力。杨淑英等^[9]提出一种考虑动态无功支持的控制策略,该方案在电网电压对称骤升时,可以提供一定的感性无功,但深度不对称时的控制策略尚未提及,同时该方案必须配合直流母线回路的斩波电路才能实现高电压穿越,因而增加了系统成本。刘其辉等^[10]在电网电压骤升时采用动态电压恢复器,通过补偿正常和故障情况下的电压差值,维持发电机电网内线端的电压不变。C.

Wessels等^[5]提出了一种直流电压的柔性控制策略,直流电压的参考值随着网侧电压的变化而变化,可以减少变流器的功率损耗。但上述各种控制策略均存在控制算法较为复杂而难以实现工程化,且存在控制系统不稳定等问题。因此,本文提出一种基于转子基波电压协同输出控制双馈变流器高电压穿越方法。仿真试验结果表明,该控制方案不仅可以保证在电网电压不对称升高期间双馈风电机组不脱网运行,还能向电网提供一定的感性无功功率,同时该方法不需要使用直流母线电压斩波电路,节省了成本,具有很好的实际工程应用价值。

2 网压骤升时,转子电压暂态分析

在电网不对称条件下,利用双馈电机矢量电机模型对转子的电压特性进行分析^[11]。对于双馈异步风力发电机(double-fed induction generator, DFIG),按电动机惯例,定、转子电压的矢量方程如下:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{abc}^s = R_s \mathbf{i}_{abc}^s + p \boldsymbol{\psi}_{abc}^s, \\ \mathbf{u}_{abc}^r = R_r \mathbf{i}_{abc}^r + p \boldsymbol{\psi}_{abc}^r. \end{cases} \quad (1)$$

定、转子磁链的矢量方程如下:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi}_{abc}^s = L_s \mathbf{i}_{abc}^s + L_m e^{-j(\omega_l - \omega_r)t} \mathbf{i}_{abc}^r, \\ \boldsymbol{\psi}_{abc}^r = -\frac{1}{2} L_m e^{j(\omega_l - \omega_r)t} \mathbf{i}_{abc}^s + L_r \mathbf{i}_{abc}^r. \end{cases} \quad (2)$$

式(1)(2)中: $\mathbf{u}_{abc}^s$ 、 $\mathbf{i}_{abc}^s$ 、 $\boldsymbol{\psi}_{abc}^s$ 分别为定子三相静止坐标系下的定子电压矢量、电流矢量和磁链矢量; $\mathbf{u}_{abc}^r$ 、 $\mathbf{i}_{abc}^r$ 、 $\boldsymbol{\psi}_{abc}^r$ 分别为转子三相旋转坐标系下的转子电压矢量、电流矢量和磁链矢量; R_s 和 R_r 分别为定、转子电阻; L_s 、 L_r 和 L_m 分别为定、转子等效自感和互感; $(\omega_l - \omega_r)t$ 表示定子三相静止坐标系与转子三相旋转坐标系之间的夹角; p 为微分算子。

在电网不平衡条件下,电网电压矢量 $\mathbf{u}_s$ 和电机磁链矢量 $\boldsymbol{\psi}_s$ 可视作由正序、零序、负序电压和磁链组成,即:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_s = \mathbf{u}_{s+}^+ + \mathbf{u}_{s0}^0 e^{-j\omega_l t} + \mathbf{u}_{s-}^- e^{-2j\omega_l t}, \\ \boldsymbol{\psi}_s = \boldsymbol{\psi}_{s+}^+ + \boldsymbol{\psi}_{s0}^0 e^{-j\omega_l t} + \boldsymbol{\psi}_{s-}^- e^{-2j\omega_l t}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{u}_{s+}^+$ 、 $\mathbf{u}_{s0}^0$ 、 $\mathbf{u}_{s-}^-$ 、 $\boldsymbol{\psi}_{s+}^+$ 、 $\boldsymbol{\psi}_{s0}^0$ 和 $\boldsymbol{\psi}_{s-}^-$ 分别为电网电压和电机磁链在正序同步旋转坐标系、零序坐标系、负序同步旋转坐标系下的正序、零序和负序分量,且都为常数。

下面基于式(1)~(3),分析转子电压的幅值和频率特点。

假设发电机转子开路,忽略定子电阻,由式(1)可知,

$$\mathbf{u}_{abc}^r = p\mathbf{\Psi}_{abc}^r = -L_m p \left(e^{j(\omega_1 - \omega_r)t} \mathbf{i}_{abc}^s \right) = -\frac{L_m}{L_s} p \left(e^{j(\omega_1 - \omega_r)t} \mathbf{\Psi}_{abc}^s \right) \quad (4)$$

将式(3)代入式(4), 可得:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{abc}^r = & -\frac{L_m}{L_s} p \left(\mathbf{\Psi}_{s+}^+ e^{j(\omega_1 - \omega_r)t} + \right. \\ & \left. \mathbf{\Psi}_{s0}^0 e^{j(\omega_1 - \omega_r)t} e^{-j\omega_1 t} + \mathbf{\Psi}_{s-}^- e^{j(\omega_1 - \omega_r)t} e^{-2j\omega_1 t} \right) = \\ & -\frac{L_m \omega_1 \mathbf{\Psi}_{s+}^+}{L_s} \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1} e^{j(\omega_1 - \omega_r)t} - \frac{L_m \omega_1 \mathbf{\Psi}_{s0}^0}{L_s} \frac{\omega_1 - (\omega_1 - \omega_r)}{\omega_1} \cdot \\ & e^{-j\omega_1 t} - \frac{L_m}{L_s} \omega_1 \mathbf{\Psi}_{s-}^- \frac{2\omega_1 - (\omega_1 - \omega_r)}{\omega_1} e^{-j(\omega_1 + \omega_r)t} = \\ & \frac{L_m}{L_s} s \mathbf{u}_{s+}^+ e^{j(\omega_1 - \omega_r)t} + \frac{L_m}{L_s} (1-s) \mathbf{u}_{s0}^0 e^{-j\omega_1 t} e^{j(\omega_1 - \omega_r)t} + \\ & \frac{L_m}{L_s} (2-s) \mathbf{u}_{s-}^- e^{-j2\omega_1 t} e^{j(\omega_1 - \omega_r)t} = \\ & \mathbf{u}_{+dq}^{s-r} + \mathbf{u}_{0dq}^{s-r} e^{-j\omega_1 t} + \mathbf{u}_{-dq}^{s-r} e^{-j2\omega_1 t} \quad (5) \end{aligned}$$

式中: s 为转差, 且 $s = \frac{\omega_1 - \omega_r}{\omega_1}$; $\frac{L_m}{L_s}$ 约等于 1;

$\mathbf{u}_{+dq}^{s-r}$ 、 $\mathbf{u}_{0dq}^{s-r}$ 、 $\mathbf{u}_{-dq}^{s-r}$ 分别为正序、零序、负序产生的转差坐标系下转子 dq 轴电压。

由式(5)可知, 当发电机转子旋转方向与电网电压旋转方向一致时, $\mathbf{u}_{+dq}^{s-r}$ 只有正序电网电压的 s 倍大小, 并为直流量; $\mathbf{u}_{0dq}^{s-r}$ 为零序电网电压的 $1-s$ 倍大小, 其频率为一倍电网频率; 而 $\mathbf{u}_{-dq}^{s-r}$ 为负序电网电压的 $2-s$ 倍大小, 其频率为 2 倍电网频率。由转子电压特性可知, 当电网不平衡时, 若仍然采用常规控制方法, 则变流器不可控制。如果这时转子电压可控制, 则必须采取更先进的方法。

3 基于转子基波电压协同输出控制的转子侧变流器控制原理分析

3.1 电网电压不对称时转子电压、转子功率计算

同步旋转 d 、 q 坐标系下 DFIG 的数学模型^[12] 可表示如下:

1) 磁链方程。磁链方程式为

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = L_s \mathbf{i}_{sd} + L_m \mathbf{i}_{rd}, \\ \Psi_{sq} = L_s \mathbf{i}_{sq} + L_m \mathbf{i}_{rq}, \\ \Psi_{rd} = L_m \mathbf{i}_{sd} + L_r \mathbf{i}_{rd}, \\ \Psi_{rq} = L_m \mathbf{i}_{sq} + L_r \mathbf{i}_{rq} \end{cases} \quad (6)$$

2) 电压方程。电压方程式为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{sd} = R_s \mathbf{i}_{sd} + p\Psi_{sd} - \omega_1 \Psi_{sq}, \\ \mathbf{u}_{sq} = R_s \mathbf{i}_{sq} + p\Psi_{sq} + \omega_1 \Psi_{sd}, \\ \mathbf{u}_{rd} = R_r \mathbf{i}_{rd} + p\Psi_{rd} - \omega_s \Psi_{rq}, \\ \mathbf{u}_{rq} = R_r \mathbf{i}_{rq} + p\Psi_{rq} + \omega_s \Psi_{rd} \end{cases} \quad (7)$$

式(6)~(7)中: $\mathbf{u}_{sd}$ 、 $\mathbf{u}_{sq}$ 分别为定子电压在 d 、 q 轴上的分量; $\mathbf{i}_{sd}$ 、 $\mathbf{i}_{sq}$ 分别为定子电流在 d 、 q 轴上的分量; $\mathbf{u}_{rd}$ 、 $\mathbf{u}_{rq}$ 分别为转子电压在 d 、 q 轴上的分量; $\mathbf{i}_{rd}$ 、 $\mathbf{i}_{rq}$ 分别为转子电流在 d 、 q 轴上的分量; ω_s 为转差角速度; ω_1 为电网角频率; Ψ_{sd} 、 Ψ_{sq} 分别为定子磁链在 d 、 q 轴上的分量, Ψ_{rd} 、 Ψ_{rq} 分别为转子磁链在 d 、 q 轴上的分量。

采用电网电压定向时, 由于双馈电机定子被直接接入电网, 故 $\mathbf{u}_{sd} = 0$, $\mathbf{u}_{sq} = \mathbf{u}_s$, 其中 $\mathbf{u}_s$ 为网压相电压幅值。稳态时, $\Psi_{sd} = \mathbf{u}_{sq} / \omega_1$, $\Psi_{sq} = \mathbf{u}_{sd} / \omega_1$ 。将 Ψ_{sd} 、 Ψ_{sq} 分别代入式(6)前两式, 可得:

$$\begin{cases} \mathbf{i}_{rd} = (\Psi_s - L_s \mathbf{i}_{sd}) / L_m, \\ \mathbf{i}_{rq} = -L_s \mathbf{i}_{sq} / L_m \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)后两式, 可得:

$$\begin{cases} \mathbf{i}_{sd} = \frac{L_m}{L_m^2 - L_s L_r} \Psi_{rd} - \frac{L_r}{L_m} \frac{L_m}{L_m^2 - L_s L_r} \Psi_s, \\ \mathbf{i}_{sq} = \frac{L_m}{L_m^2 - L_s L_r} \Psi_{rq} \end{cases} \quad (9)$$

在同步坐标系中, 定子有功功率 P 、无功功率 Q 的计算公式如下:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (\mathbf{u}_{sd} \mathbf{i}_{sd} + \mathbf{u}_{sq} \mathbf{i}_{sq}), \\ Q = \frac{3}{2} (\mathbf{u}_{sq} \mathbf{i}_{sd} - \mathbf{u}_{sd} \mathbf{i}_{sq}) \end{cases} \quad (10)$$

当采用电网电压定向时, 由 $\mathbf{u}_{sd} = 0$, $\mathbf{u}_{sq} = \mathbf{u}_s$, 以及式(9), 将式(10)简化为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} \mathbf{u}_s \frac{L_m}{L_m^2 - L_r L_s} \Psi_{rq}, \\ Q = \frac{3}{2} \mathbf{u}_s \frac{L_m}{L_m^2 - L_r L_s} \left(\Psi_{rd} - \frac{L_r}{L_m} \Psi_s \right) \end{cases} \quad (11)$$

因 MW 级发电机的转子电阻很小, 可忽略不计, 由式(7)后两式可得:

$$\begin{cases} \Psi_{rd} = \mathbf{u}_{rq} / \omega_s, \\ \Psi_{rq} = -\mathbf{u}_{rd} / \omega_s \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(11), 可得:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} \mathbf{u}_s \frac{L_m}{L_m^2 - L_r L_s} \times \frac{\mathbf{u}_{rd}}{\omega_s}, \\ Q = \frac{3}{2} \mathbf{u}_s \frac{L_m}{L_m^2 - L_r L_s} \left(\frac{\mathbf{u}_{rq}}{\omega_s} - \frac{L_r}{L_m} \Psi_s \right) \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知, 控制双馈电机转子输出电压 $\mathbf{u}_{rd}$, 即可控制定子侧绕组功率。

当网压不对称时, 转子的有功功率计算公式为

$$P_i^p = 1.5 (\mathbf{u}_{rd}^p \mathbf{i}_{rd}^p + \mathbf{u}_{rq}^p \mathbf{i}_{rq}^p), \quad (14)$$

式中上标 p 表示正序分量。

由式(14)可知,当电网电压深度不对称升高时,要控制转子变流器输出有功功率基波正序分量为零,即控制变流器输出一个与双馈电机转子输出电压 u_{rd}^p 、 u_{rq}^p 大小一致、相位完全相反的电压,控制转子电压电势与变流器输出端电势一致,势能差为零,从而控制转子基波正序有功功率没有流动。这时转子绕组对于转子有功功率基波正序分量相当于开路。要控制转子有功功率开路,必须要实时检测转子电压的基波电压 u_{rd}^p 、 u_{rq}^p 分量。

由前面的分析可知,由于大部分风电机组相变的低压侧均为不接地系统,零序分量没有通路。在电网不对称时,定子、转子电流的 d 、 q 轴分别含有一个两倍电网频率的分量。本文采用正、负坐标系分别计算出定子、转子电流的 d 、 q 轴正序、负序分量,其检测原理框图见图1。

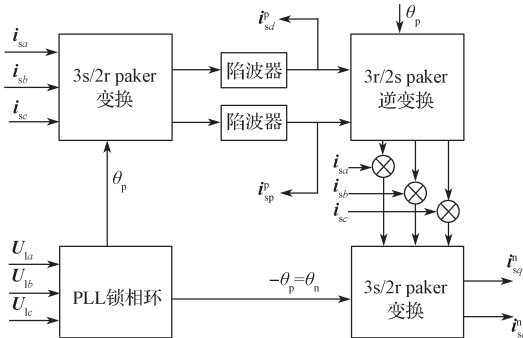


图1 正、负序坐标系中定子电流 d 、 q 分量检测原理

Fig. 1 Detection principle of d and q components of the stator current in positive and negative sequence frame

转子电流正序分量检测与定子电流正序分量检测原理一致,把转子电流正序分量 i_{rd}^p 、 i_{rq}^p 替代公式(7)中的 i_{td} 、 i_{tq} ,同理以 i_{sd}^p 、 i_{sq}^p 替代 i_{sd} 、 i_{sq} ,可得到转子基波电压 u_{rd}^p 、 u_{rq}^p 分量如下:

$$\begin{cases} u_{rd}^p = R_r i_{rd}^p - \omega_s (L_m i_{sd}^p + L_r i_{rd}^p), \\ u_{rq}^p = R_r i_{rq}^p + \omega_s (L_m i_{sq}^p + L_r i_{rq}^p). \end{cases} \quad (15)$$

3.2 基于转子基波电压协同输出控制的双馈变流器控制原理

在电网电压深度不对称升高时,在正、负序坐标系中计算出转子电压的基波正序分量 u_{rd}^p 、 u_{rq}^p ,将该分量叠加到转子变流器输出电压,控制转子绕组输出有功功率正序基波分量为零,同时根据计算出转子的有功功率基波分量,计算出网侧变流器 d 轴对应输出的电流值,计算公式如下:

$$i_{ld} = P_r^p / U_s + (2-s) P_r^n / U_s. \quad (16)$$

式中 P_r^p 、 P_r^n 分别为转子侧有功功率正序、负序分量。将该分量叠加到网侧变流器 d 轴分量上,把直流母线上剩余的转子有功功率通过网侧变流器送至电网,

保证直流母线不过压。图2为基于转子基波电压协同输出控制的双馈变流器控制原理框图。

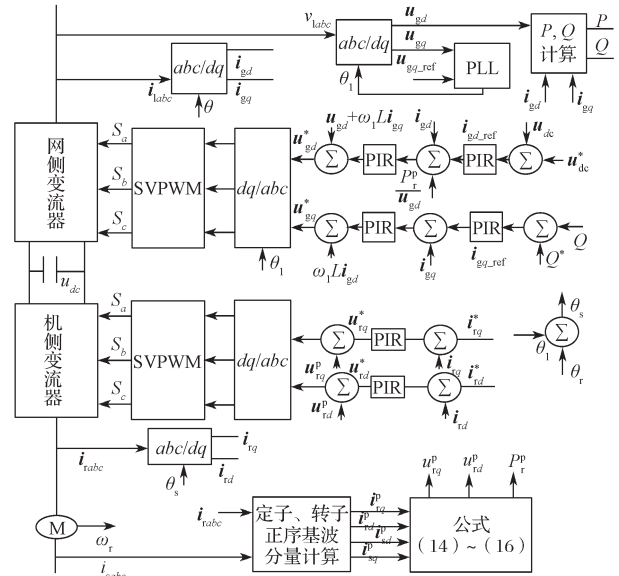


图2 基于转子基波电压协同输出控制的双馈变流器控制原理框图

Fig. 2 Block diagram of control principle of doubly fed converter based on rotor fundamental voltage coordinated output control

3.3 双馈变流器的高电压穿越实现

在电网电压骤升期间,为了满足直流母线电压稳定、无功功率及时支持电网电压下降这两项关键性指标,必需合理优化转子侧变流器、网侧变流器控制策略。图3为高电压穿越期间变流器控制逻辑框图。

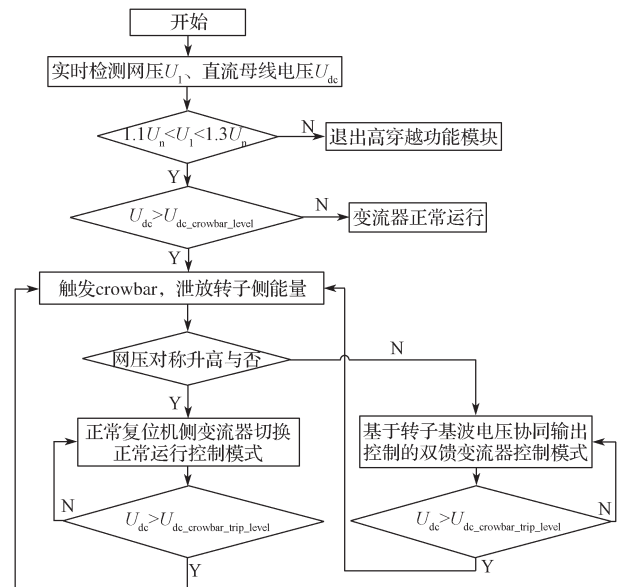


图3 双馈变流器高电压穿越控制流程图

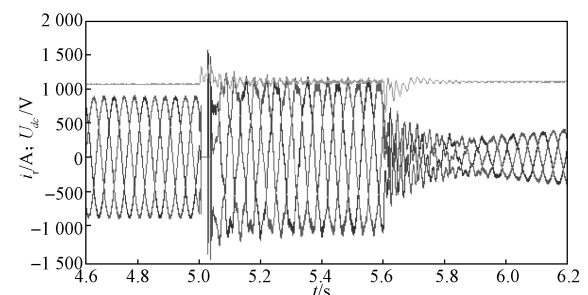
Fig. 3 Flow chart of the high voltage ride through control for the doubly-fed converter

当电网电压低于1.1倍额定网压时,网侧变流器采用单位因数工作模式,机侧变流器采用最优功率跟

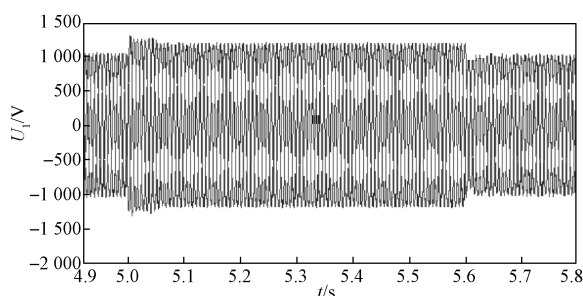
踪模式; 当检测直流母线电压 U_{dc} 大于触发 crowbar 保护值 $U_{dc_crowbar_trip_level}$ 时, 立即导通 crowbar 电路 10 ms, 泄放冲击能量。然后判断网压上升的类型是否对称: 如果对称, 则复位转子侧变流器向电网输送感性无功功率, 同时网侧变流器也向电网输送感性无功功率; 如果不对称, 则将网侧、转子侧变流器切换至基于转子基波电压协同输出控制的双馈变流器控制模式, 控制直流母线电压波动, 使其稳定在安全电压以内。若启动转子变流器过程中直流母线电压 U_{dc} 大于触发 crowbar 保护值 $U_{dc_crowbar_trip_level}$ 时, 立即导通 crowbar 电路 10 ms, 泄放冲击能量, 以保证整个网压升高期间直流母线电压控制在安全值范围以内。

4 试验结果

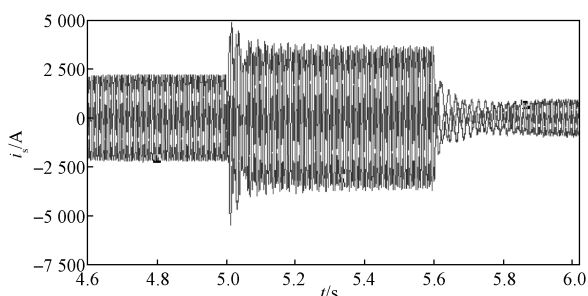
为了验证本文所提 HVRT 控制方案的有效性, 对商用 2.0 MW 双馈电机进行半实物仿真研究。控制器为实物, 电机模型的参数与实际双馈电机一致。图 4 所示为三相电网电压对称升高 30% 时高电压穿越半实物的试验波形。



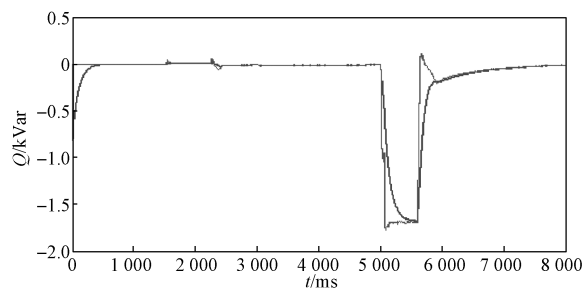
a) 转子电流与直流母线电压



b) 电网电压



c) 定子电流



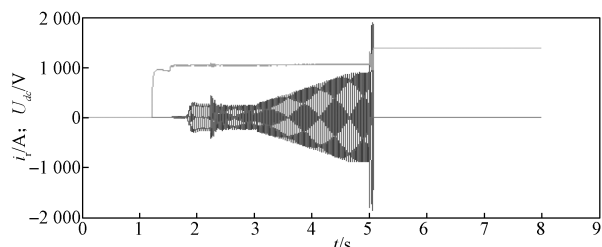
d) 无功功率

图 4 三相电网电压对称升高 30% 时
高电压穿越半实物试验波形

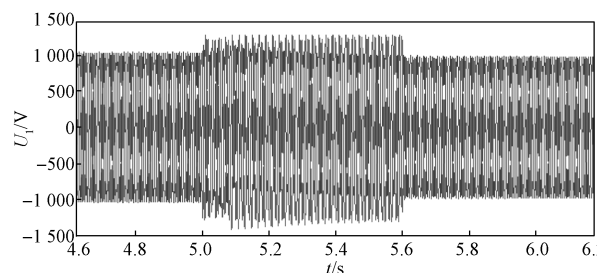
Fig. 4 Semi-physical test waveforms of the high voltage ride through with an increase of 30% in the three-phase grid voltage symmetry

由图 4 可知, 当电网电压瞬间对称升高 30% 后, 持续时间约 600 ms, 将冲击能量抬高直流母线电压到 $U_{dc_crowbar_trip_level}$ (1 280 V), 此时系统立即导通 crowbar 泄放冲击能量, 当 crowbar 导通时, crowbar 电阻 (0.4Ω) 也吸收电网无功功率, 同时将电网电压降低 5%, 当 crowbar 电阻电压降到安全值以下时, 切除 crowbar, 快速启动转子侧变流器, 向电网输送感性无功功率。整个网压升高期间, 保证直流母线不过压, 因而实现了电网电压对称升高时的高电压穿越。

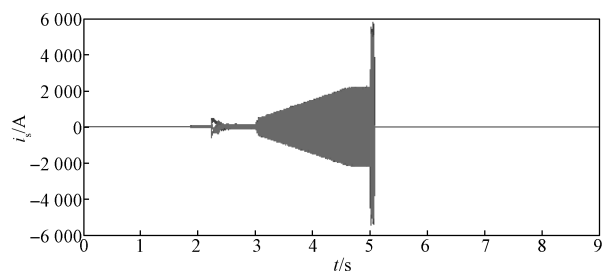
图 5 所示为电网电压不对称两相升高 30% 时高电压穿越半实物的试验波形。



a) 转子电流与直流母线电压



b) 电网电压



c) 定子电流

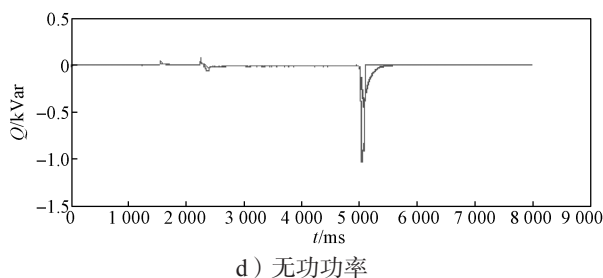
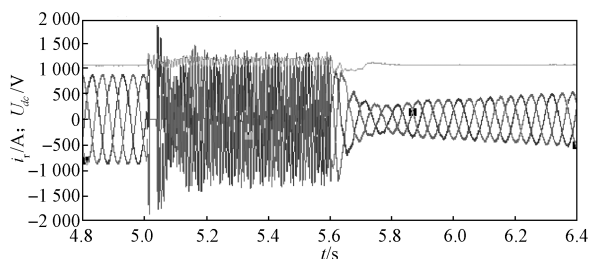


图5 两相电网电压不对称升高30%、转子变流器正常运行时控制方法的高电压穿越半实物试验波形

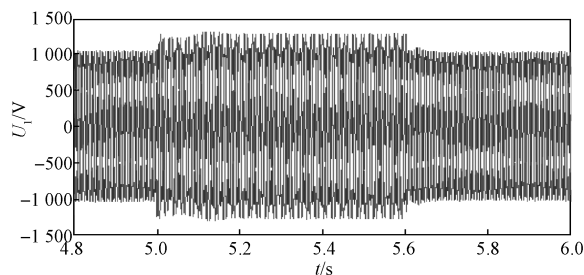
Fig. 5 Semi-physical test waveforms of the high voltage ride through with an increase of 30% in the two-phase grid voltage symmetry based on the control method of the normal operation

由图5可知,采用常规控制方法,当电网电压升高时,转子变流器启动,立即过压,导致网压升高期间变流器无法正常工作,致使高电压穿越失败。

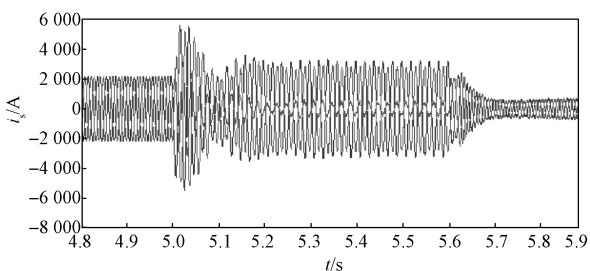
图6所示为电网电压不对称两相升高30%时,高电压穿越半实物的试验波形。由图可知,当直流母线电压大于 $U_{dc_crowbar_trip_level}$ 时,立即导通crowbar泄放冲击能量,转子侧变流器切换至基于转子基波电压协同输出控制的双馈变流器控制模式,控制直流母线电压波动,使其稳定在安全电压以下。



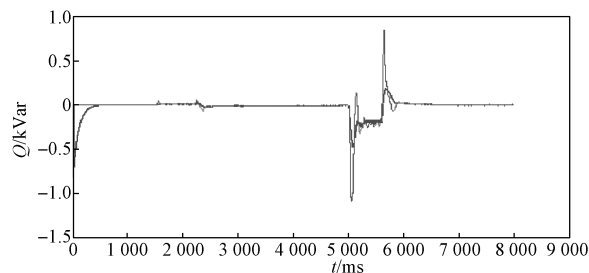
a) 转子电流与直流母线电压



b) 电网电压



c) 定子电流



d) 无功功率

图6 两相电网电压不对称升高30%、转子变流器采用HVRT控制方法的高电压穿越半实物试验波形

Fig. 6 Semi-physical test waveforms of the high voltage ride through with an increase of 30% in the two-phase grid voltage symmetry based on the rotor fundamental wave voltage coordinated output

同时机组向电网输送0.4倍额定值的感性无功功率,从而有利于网压升高期间的快速恢复和其它并网负载的安全运行,实现了电网电压骤升期间机组不脱网运行。

5 结论

本文研究了电网电压不对称时,双馈风力发电机的控制方法,并在此基础上提出了一种基于转子基波电压协同输出控制的双馈变流器高电压穿越方法。研究结果表明:

1) 电网不对称时,基于转子基波电压协同输出控制的双馈变流器高电压穿越控制方法能够有效控制直流母线的电压波动;

2) 结合crowbar电路,实现了在电网电压升高期间风力发电机组不脱网运行。

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] 中国电力科学研究院. 风电机组高压穿越能力测试规程(试行版本)[S]. 北京: 中国电力科学研究院, 2014: 2-10.
- [3] XU Hailiang, ZHANG Wei, NIAN Heng, et al. Improved Vector Control of DFIG Based Wind Turbine During Grid Dips and Swells[C]//International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS). Incheon:

- KIEE, 2010: 511–515.
- [4] MOHSENI M, MASOUM M A S, ISLAM S M. Low and High Voltage Ride-Through of DFIG Wind Turbines Using Hybrid Current Controlled Converters[J]. Electrical Power System Research, 2011, 81(7): 1456–1465.
- [5] WESSELS C, FUCHS F W. High Voltage Ride Through with FACTS for DFIG Based Wind Turbines[C]//13th European Conference on Power Electronics and Applications. Barcelona: IEEE, 2009: 1–10.
- [6] ESKANDER M N, AMER S I. Mitigation of Voltage Dips and Swells in Grid-Connected Wind Energy Conversion Systems[C]//ICCAS–SICE. Fukuoka: SICE, 2009: 885–890.
- [7] 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.
- XIE Zhen, ZHANG Xing, SONG Haihua, et al. Variable Damping Based Control Strategy of Doubly Fed Induction Generator Based Wind Turbines Under Grid Voltage Swell[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 39–46.
- [8] 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.
- XIE Zhen, ZHANG Xing, YANG Shuying, et al. High Voltage Ride-Through Control Strategy of Doubly Fed Induction Wind Generators Based on Virtual Impedance[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(27): 16–23.
- [9] 杨淑英, 张兴, 张崇巍, 等. 电压跌落激起的双馈型风力发电机电磁过渡过程[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 85–91.
- YANG Shuying, ZHANG Xing, ZHANG Chongwei, et al. Electro-Magnetic Transition of Doubly Fed Wind Turbines Initiated by Voltage Dip[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 85–91.
- [10] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机的运行控制与建模仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 43–50.
- LIU Qihui, HE Yikang, ZHANG Jianhua. Operation Control and Modeling-Simulation of AC-Excited Variable-Speed Constant-Frequency(AEVSCF) Wind Power Generator[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26(5): 43–50.
- [11] LIU Changjin, HUANG Xiaobo, CHEN Min, et al. Flexible Control of DC-Link Voltage for Doubly Fed Induction Generator During Grid Voltage Swell[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta: IEEE, 2010: 3091–3095.
- [12] RAHIMI M, PARNIANI M. Grid-Fault Ride-Through Analysis and Control of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generators[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(2): 184–195.
- (责任编辑: 廖友媛)