

DOI: 10.7667/PSPC161909

## 电网电压骤升情况下双馈变流器控制策略研究

罗少杰<sup>1</sup>, 朱玲<sup>2</sup>

(1. 国网浙江省电力公司杭州供电公司, 浙江 杭州 310000;  
2. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 210003)

**摘要:** 风电场电网电压跌落恢复过程中若无功过剩、负载突然切除以及风电场 35 kV 非有效接地系统因单相接地故障引发谐振过电压, 电网电压面临升高风险。由于双馈型风力发电机定子与电网相连, 电网电压骤升时其暂态过程会造成定转子电压电流冲击和电机转矩振荡。为实现机组高电压穿越, 针对电网电压骤升期间变流器不脱网的保护, 拓扑上增加了直流 Chopper 电路, 制定了一套穿越期间的脉冲管理逻辑。从变流器模型最大输出电压出发, 提出了网侧无功优先的控制策略。转子侧变流器引进转子附加阻尼控制, 加快直流磁链衰减, 避免直流 Chopper 频繁动作, 减轻机组转矩振荡过程。通过 Simulink 建立主回路模型, 在控制程序嵌入 Simulink 作为控制器的方式进行混合仿真, 更加逼近现场环境。结果验证了所提策略与保护方案的有效性和可行性, 同时也验证了程序代码的正确性。

**关键词:** 高电压穿越; 脉冲管理逻辑; 无功优先; 转子附加电阻; Chopper 电阻

### Research on control strategy of double feed converter under grid voltage soared

LUO Shaojie<sup>1</sup>, ZHU Ling<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310000, China;  
2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Surplus of reactive power at recovery progress after grid voltage dips, suddenly removed load and resonance over-voltage because of single phase to earth fault in the neural indirectly grounded power systems will cause grid surge. For the stator of doubly-fed wind power generator connected to grid, the transient process of grid surging will cause the stator voltage and current shock and motor torque oscillate. DC chopper circuit is added and pulse-management-control logic is formulated to achieve the protection of converter to ride through grid voltage soared period. The grid reactive power priority strategy is proposed in order to output maximum voltage. Besides, virtual rotor damping control is used on converter to speed up DC magnetic relaxation, avoid DC Chopper frequently operation and alleviate oscillation of the motor torque. Model of main electricity circuit is established by Simulink and program is embedded in Simulink as a controller module in the hybrid simulation in order to be close to the actual circumstances. According to the simulation results, the validity and feasibility of strategy and protection scheme are proved. Besides, the accuracy of the program code is confirmed.

**Key words:** HVRT; pulse management logic; reactive power priority; rotor additional damping; Chopper resistor

## 0 引言

随着风力发电机容量及风电场规模的不断扩大, 若风电机组因电网故障跳机而不能像常规能源那样对电网提供频率及电压的支撑, 会对电网的稳定运行造成严重影响<sup>[1-2]</sup>。国家电网公司相关并网导则已对风电机组低电压穿越功能作出明确规定, 风电变流器的低电压穿越技术已趋于成熟<sup>[3-5]</sup>。轻度电压跌落时通过变流器自身有效控制来实现不脱网运

行; 深度电压跌落时一方面通过增加额外硬件设备(如转子侧并联 Crowbar 装置和直流环节并联 Chopper 电路等)来抑制故障期间的过电压和过电流对变流器及母线电容器的危害, 另一方面通过改进双馈机组的控制策略使之在条件允许时尽快对故障电网提供无功支撑<sup>[6-9]</sup>。与电压跌落相对应, 电网电压骤升也是一种电网故障现象。电网电压骤升通常伴随着电压跌落产生, 产生原因主要有<sup>[10]</sup>: 1) 35 kV 非有效接地系统因单相对地故障引发谐振过电压,

导致低压侧电压对称升高；2) 电网电压跌落恢复过程中因无功装置调节速度不够导致无功过剩；3) 突然的电流扰动；4) 大电容投切等。对风机而言电压突然升高会导致转子电流和直流母线电压越限，从而对定子变流器以及直流母线电容构成威胁，风电机组出于自我保护会主动脱网，因此需要对风电机组高电压穿越控制策略加以研究。目前，国际上澳大利亚、美国、德国、西班牙和丹麦等国电网规程对风电机组 HVRT 能力已有初步规范，如澳大利亚电网规程要求风电机组能够在并网点电压骤升至 1.3 倍标称值时不脱网运行 60 ms，并提供足够大的故障恢复电流。我国最新的风电场接入电网技术规范<sup>[11]</sup>也对风电场高电压穿越能力作了明确规定，要求电网电压升高至额定电压的 110%~115% 时风机具备持续运行 10 s 的能力，升高至额定电压的 115%~120% 时风机具备持续运行 200 ms 的能力。考虑一些特殊场景，如大规模风电直流送出系统直流双极闭锁故障，若系统无功调节能力不足，电网电压升高甚至超过 1.2 p.u。保守起见，下文均以电网电压最高 1.3 p.u. 为边界条件讨论风电机组的高电压穿越能力。

实现风力发电机组 HVRT 功能的方法主要从增加外部硬件电路和改进系统控制策略方面着手。针对传统 PI 调节器不能对交流分量做无静差跟踪，文献[12]引入 PIR 谐振控制器，弥补了传统 PI 调节器在动态响应上的不足，然而未提及功率波动的抑制措施。文献[13]提出了灵活可变的直流母线电压控制策略，该方法降低了故障期间电力电子器件的功率损耗，提高了双馈风力发电系统 HVRT 运行时的效率，但是算法复杂，工程不易于实现。文献[14]则根据双馈风力发电系统能量输出的特点，提出了通过吸收动态无功功率以加快电网电压恢复的高电压穿越运行控制策略，但未涉及具体的脉冲管理策略。文献[15]提出电网升高时采用动态电压恢复装置或静止同步补偿器的方法，文献[16]则采用串联网侧变换器的方案，将电网输入补偿至正常运行水平，增加了系统硬件成本，适合场站内的应用。

本文从网侧变流器和转子侧变流器的稳态数学模型出发，分析得出电网电压升高期间变流器需优先吸收一定无功功率才能确保变流器不出现过调制而失控，并理论计算出电网骤升不同程度所对应的最小无功吸收值。从双馈电机的暂态模型出发，分析了电压骤升时刻和恢复时刻变流器处于不受控状态时，需增加直流 Chopper 电路吸收暂态能量抑制直流过压。提出转子侧附加阻尼控制可加快直流磁链分量衰减，减轻机组转矩振荡过程。

## 1 模型分析

### 1.1 双馈变流器电网侧模型

双馈变流器的电网侧主回路电气图如图 1 所示。其中： $U_g$  为三相电网的电压； $E_c$  为网侧变流器模块输出电压； $U_{dc}$  为直流母线电压； $i$  为流经网侧变流器的电流； $L$  为网侧电抗。

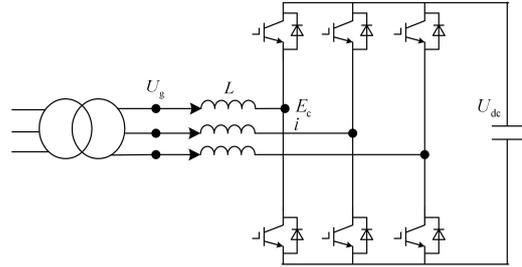


图 1 双馈变流器网侧电气图

Fig. 1 Electrical diagram of GSC converter

基于电网电压矢量定向  $dq$  轴系 ( $U_q=0$ )，取电流从电网流入变流器为正方向，两相静止坐标系下网侧变流器的数学模型为

$$\begin{cases} E_{cd} = -i_d R_g - L \frac{di_d}{dt} + \omega L i_q + U_{gd} \\ E_{cq} = -i_q R_g - L \frac{di_q}{dt} - \omega L i_d + U_{gq} \end{cases} \quad (1)$$

忽略网侧电阻  $R_g$ ，网侧变流器稳态情况下式(1)可简化为

$$\begin{cases} E_{cd} = U_{gd} + \omega L i_q \\ E_{cq} = U_{gq} - \omega L i_d \end{cases} \quad (2)$$

$$(U_g + \omega L i_q)^2 + (-\omega L i_d)^2 = E_c^2 \quad (3)$$

网侧变流器系统稳态正常运行的 4 种工况如图 2 所示。若电网电压骤升，即  $U_g$  变大，根据式(3)可知，若维持网侧变流器电流  $I_d$ 、 $I_q$  不变，则需要增大变流器输出电压值  $E_c$ ，而变流器输出电压  $E_c$  的最大值由变流器固有的脉宽调制方式和直流控制电压定值决定，基本固定不变。

假设变流器采用 SVPWM 脉冲调制方式，直流控制电压定值为  $U_{dc}$ ，变流器输出电压  $E_c$  最大为  $U_{dc}/\sqrt{3}$ ，代入式(3)得

$$\left(\frac{U_g}{\omega L} + I_q\right)^2 + (I_d)^2 = \left(\frac{E_c}{\omega L}\right)^2 \leq \left(\frac{U_{dc}}{\sqrt{3}\omega L}\right)^2 \quad (4)$$

此外，网侧电流  $I_d$ 、 $I_q$  还受功率器件额定电流  $I_{max}$  限制：

$$(I_q)^2 + (I_d)^2 \leq (I_{max})^2 \quad (5)$$

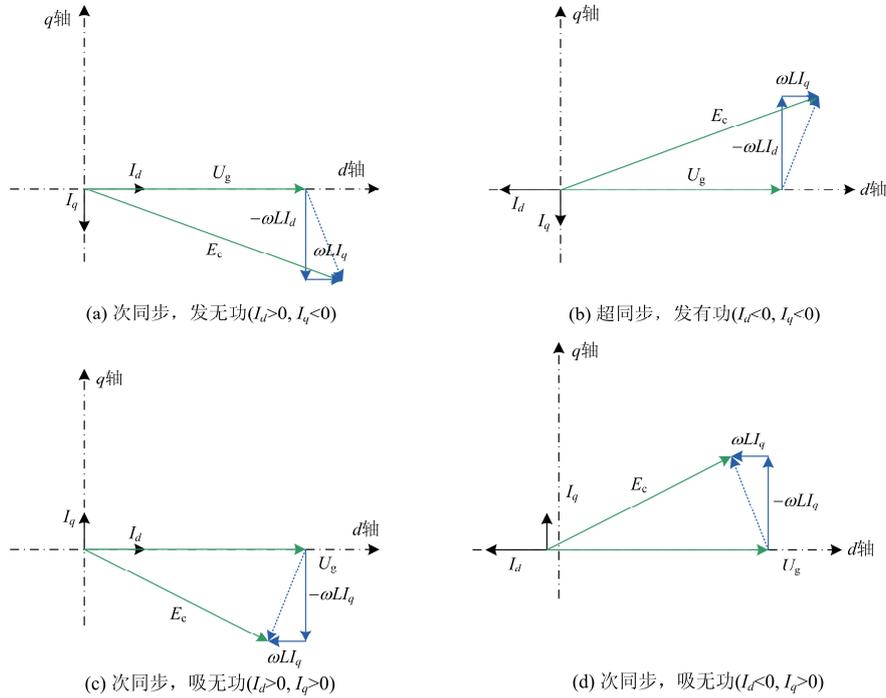


图 2 网侧变流器稳态电压矢量空间位置关系

Fig. 2 Spatial relationship of GSC steady voltage vectors

根据式(5)可知,变流器采用 SVPWM 脉冲调制方式时网侧变流器的电流运行范围是以点(0,  $-U_g/\omega L$ )为圆心,  $U_{dc}/\sqrt{3}\omega L$  为半径的圆内(包含圆)。式(4)所代表的变流器运行电压限制圆和式(5)所代表的变流器运行电流限制圆如图 3 所示。

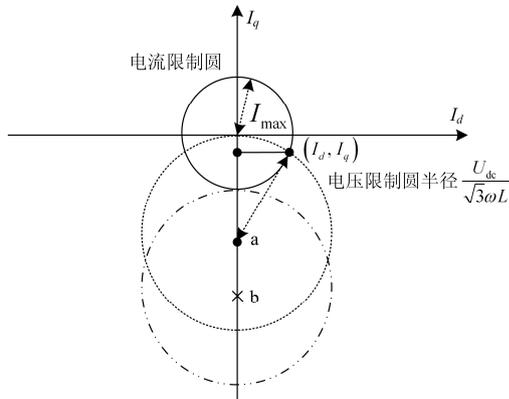


图 3 变流器运行电压和电流限制圆

Fig. 3 Voltage limit circle and current limit circle

网侧变流器电流可运行的范围为电压限制圆和电流限制圆的交集。随着电网电压的升高,最大电压限制圆的圆心下移。当圆心位于点 a 之上时,电压圆和电流圆的交集一部分位于 Y 轴正半轴,说明变流器尚具备发无功的能力;当圆心下移至点 a 和点 b 之间,交集区全部位于负半轴时,说明变流器

必须通过吸收一定的无功才能正常运行。为满足运行需要,变流器吸收的无功电流为

$$I_q = \frac{U_g}{\omega L} - \sqrt{\left(\frac{U_{dc}}{\sqrt{3}\omega L}\right)^2 - I_d^2} \quad (6)$$

当圆心继续下移至点 b 之下时,最大电压限制圆和电流限制圆无交集,变流器将无法控制运行。变流器由于母线电容电压应力的限制,直流母线电压控制在 1050~1150 V,假设母线电压  $U_{dc}=1100$  V,并网点电压骤升 1.3 倍时变流器网侧电压  $U_g$  也升高 1.3 倍,1.5 MW 满功率运行条件下按式(6)计算,网侧变流器需要吸收 q 轴电流 1130 A 才能保证变流器不会出现过调制而失控现象。

### 1.2 双馈发电机模型

双馈型风力发电机因其定子直接连接电网,当电网跌落或突变时会直接影响电机特性,从而影响转子侧变流器控制,因此有必要对双馈型发电机的暂态模型和稳态模型进行分析研究。双馈电机的等效电路图如 4 所示。

根据图 4 的等效电路,可以得出<sup>[17]</sup>

$$\begin{aligned} V_r &= \frac{L_m}{L_s} \left( \frac{d}{dt} - j\omega \right) \psi_s + [R_r + \sigma L_r] \left( \frac{d}{dt} - j\omega \right) i_r \\ \sigma &= 1 - L_m^2 / L_r L_s \\ \omega &= \omega_s - \omega_r \end{aligned} \quad (7)$$

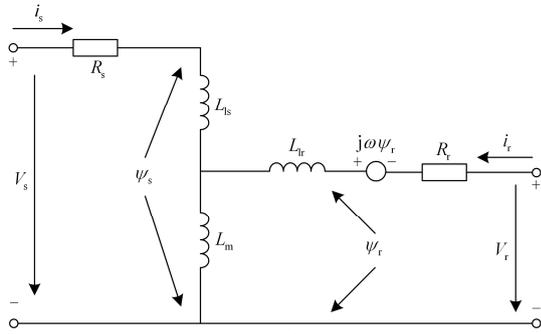


图 4 双馈电机等效电路图  
Fig. 4 Equivalent circuit of DFIG

式(7)中:  $\sigma$  为发电机暂态电感;  $\omega_s$  为定子侧电压角速度;  $\omega_r$  为转子旋转角速度。转子开路时稳态电压为

$$V_{r0} = j\omega_r \frac{L_m}{L_s} \psi_s = s \frac{L_m}{L_s} V_s e^{j\omega_s t} \quad (8)$$

式中,  $s$  是滑差率,  $s = \omega_r / \omega_s$ 。

假设电网电压在  $t=t_0$  时刻由  $V_{se}$  骤升至  $V_s$ , 转子开路暂态电压约为

$$V_{r0}(t > t_0) = \frac{L_m}{L_s} [s(1+p) + (1-s)p] V_{se} e^{j\omega_s t_0} e^{-(t-t_0)/\tau} \quad (9)$$

$$p = (V_s - V_{se}) / V_{se}$$

式中:  $p$  是电网电压的上升幅度;  $\tau$  为电机定子的电磁时间常数,  $\tau = L_s / R_s$ 。

由式(8)、式(9)可得电网电压骤升 1.1~1.3 倍时, 电机在次同步转速 1200 rpm 和超同步转速 1800 rpm 工况下的转子稳态电压及暂态电压最大值, 如表 1 所示。

由表 1 可知, 电网电压骤升瞬间, 转子开路暂态最大值均超出变流器受控范围, 暂态直流分量随时间常数  $\tau$  衰减, 变流器逐渐恢复受控。由于兆瓦级电机定子电阻较小, 系统暂态直流分量衰减较慢, 可以考虑在电压骤升期间增加系统基频阻尼<sup>[18]</sup>的控制方案, 转子侧变流器引入附加阻尼后的控制框图如图 5 所示。其中,  $k_p$ 、 $k_i$  为转子电流内环的比例、积分参数,  $R_r$  为转子电阻,  $L_r$  为转子漏感。

表 1 1200 rpm 和 1800 rpm 转速下电网电压骤升时双馈电机转子侧运行状态

Table 1 Running state of wind power generations on 1200 rpm and 1800 rpm

骤升倍数/变流器网侧电压 $U_g/V$	转速 $n/rpm$	转子开路稳态电压 $V_{r0}/V$	转子开路暂态电压最大值 $V_{rmax}/V$	变流器输出电压极限 $E_c/V$
1.1 倍/759	1200	347	867	635
1.1 倍/759	1800	347	1075	635
1.2 倍/828	1200	378	945	635
1.2 倍/828	1800	378	1172	635
1.3 倍/897	1200	410	1024	635
1.3 倍/897	1800	410	1270	635

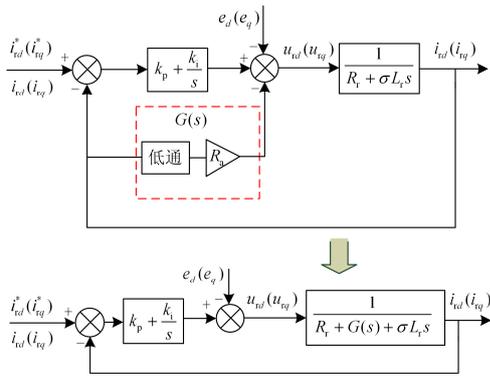


图 5 转子侧变流器引入附加电阻后的控制框图  
Fig. 5 Block diagram of the rotor current control system based on virtual resistor

具体实现方式为通过转子电流  $d$  轴分量、 $q$  轴分量经滤波器提取低频信号, 比例放大  $R_a$  倍, 作为转子电压  $u_d$  和  $u_q$  的叠加分量, 从转子侧闭环传递函数可以看出, 其物理意义等效于在转子侧引入一个低频带的附加电阻, 从而加速系统暂态磁链衰减。

## 2 技术措施和方案

实现风力发电机组 HVRT 的方法主要从增加外部耗能电路和改进系统控制策略方面着手。配备有 Crowbar 和 Chopper 硬件电路的双馈型风力发电系统结构如图 6 所示。

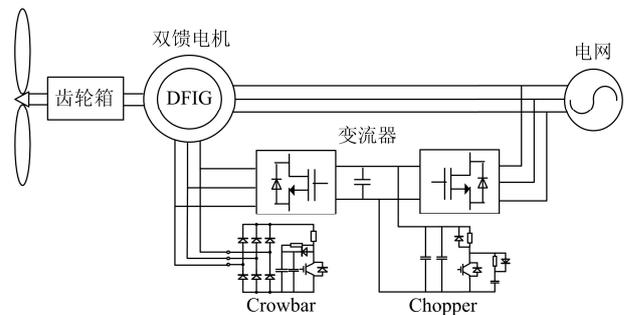


图 6 配备有 Crowbar 和 Chopper 硬件电路的双馈型风力发电系统结构

Fig. 6 DFIG system structure with Crowbar and Chopper

Chopper 和 Crowbar 电路采取直流电压与门限电压滞环比较的方式投切, Crowbar 作为后备投入电压门限高于 Chopper, Chopper 的投入和切除门限均高于直流母线正常运行电压。电网电压骤升时刻与恢复时刻, 由于直流磁链分量存在, 直流母线电压升高, Chopper 短时投切吸收暂态能量。

当电网观测器检测到电压升高达到高电压穿越门限时, 给出高电压穿越标志, 风机控制系统由正常状态跳转至异常状态, 异常过程中若发生过电流则封锁脉冲但不触发保护跳机, 待封锁脉冲后过流故障消失再开启脉冲, 变流器吸收一定的无功, 通过增大网侧电感上的正向压降从而避免网侧变流器 SVPWM 过调制, 同时转子侧变流器吸收适量的无功功率且降低有功功率运行, 转子附加阻尼控制加速直流磁链的衰减, 有助于变流器尽快受控。电网恢复后, 系统状态由异常状态跳转至恢复状态, 电网侧和转子侧变流器均停止吸收无功, 待恢复至电网骤升前的稳态功率后, 系统状态再次跳转至正常状态, 代表本次高电压穿越控制结束, 具体的风电机组控制状态跳转时序如图 7 所示。高电压穿越期间 Crowbar 装置投入信号与电网电压突变引起的过流信号均会使脉冲闭锁但不进入停机流程, 待信号消失后脉冲则立即开启。高电压穿越期间若发生其他机组故障(非过流), 控制逻辑与正常运行时一致, 先闭锁脉冲再停机, 高电压穿越期间风电机组变流器的脉冲管理逻辑如图 8 所示。

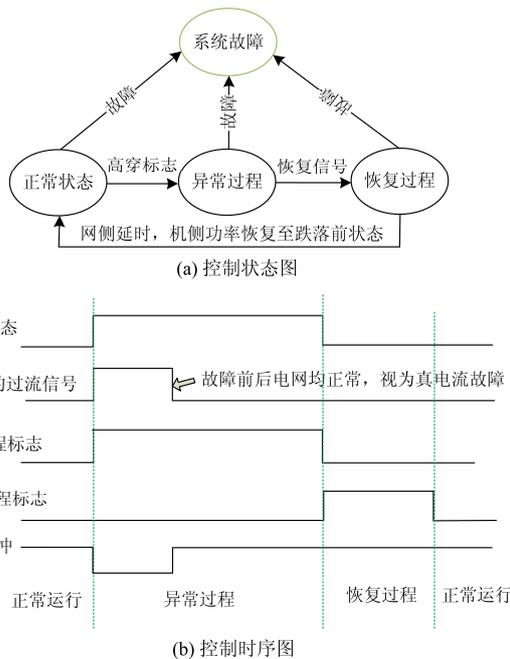


图 7 高电压期间控制状态时序图

Fig. 7 State diagram and timing chart during higher voltage period

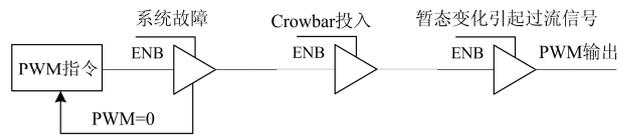


图 8 高电压期间脉冲管理逻辑

Fig. 8 Pulse management during high voltage period

### 3 仿真验证

Simulink 环境下搭建双馈 1.5 MW 风电机组模型: 定子电阻值  $R_1=0.0024 \Omega$ , 定子电抗值  $X_1=0.0349 \Omega$ , 转子电阻值  $R_2=0.0033 \Omega$ , 转子电抗值  $X_2=0.0297 \Omega$ , 激磁电阻值  $R_m=0.022 \Omega$ , 激磁电抗值  $X_m=1.005 \Omega$ , 开口电压  $U_r=1945 \text{ V}$ , Chopper 电阻为  $0.8 \Omega$ , Crowbar 电阻为  $0.4 \Omega$ , 采用文章所述 HVTR 控制策略, 将控制代码嵌入仿真模块中进行仿真验证。稳态双馈机组接近 1.5 MW 满功率运行, 转速 1800 r/min, 功率因数约 0.99, 1.5 s 模拟电网电压骤升至 1.3 p.u., 持续时间 1 s。图 9 为无转子附加虚拟电阻控制的仿真波形, 图 10 为增加转子附加虚拟电阻控制的仿真波形。

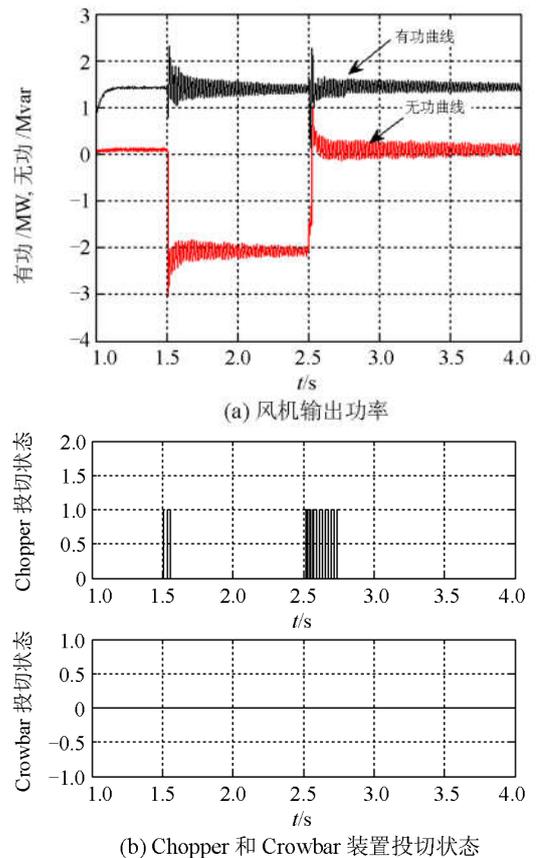


图 9 无转子附加阻尼控制

Fig. 9 Control strategy without rotor virtual resistor

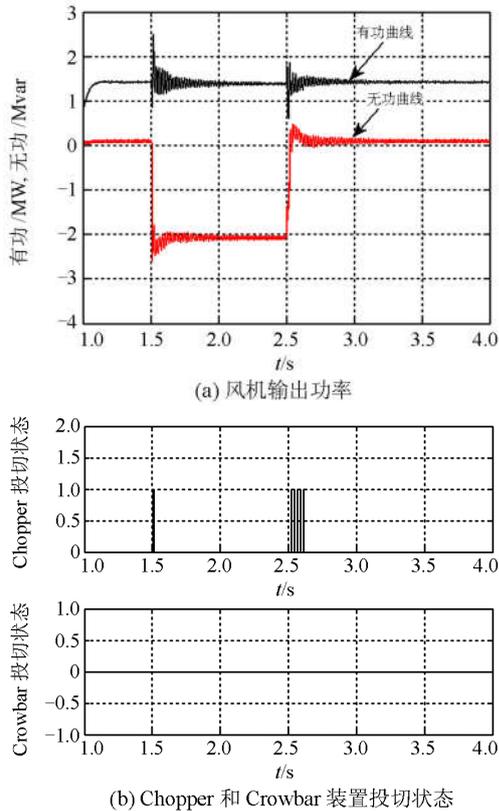


图 10 转子附加电阻控制

Fig. 10 Control strategy with rotor additional resistance

由图 9、图 10 看出，文章提出的高电压穿越策略在电网电压升高期间，通过变流器优先吸收一定的无功功率，从而增加网侧电抗上的正向压降，有效保证了变流器不过压安全运行。不论转子侧有无附加阻尼控制，高电压穿越期间 Crowbar 装置均未达到动作门限，直流 Chopper 装置在电压升高和恢复初期短时投切吸收暂态能量，加快电压突变引起的直流磁链分量衰减。对比图 9 和图 10，转子侧附加阻尼控制减小了电网突变引起的功率尖峰，加快了直流磁链衰减速度，避免了直流 Chopper 频繁动作，有效减轻了机组功率振荡过程。

#### 4 结论

文章针对电网电压骤升给风电机组带来的脱网和转矩振荡风险，从变流器着手，通过硬件上增加直流 Chopper 电路以吸收暂态能量，软件上实施高电压穿越期间的脉冲管理逻辑以及优先吸收无功的控制策略，有效保证了风电机组的安全稳定运行。变流器转子侧引进的转子附加阻尼控制，避免了直流 Chopper 频繁动作，减轻了机组转矩振荡，增强了双馈型风电机组的电网适应能力。

#### 参考文献

- [1] 徐海亮, 章伟, 贺益康, 等. 双馈型风电机组低电压穿越技术要点及展望[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 8-15.  
XU Hailiang, ZHANG Wei, HE Yikang, et al. A review on low voltage ride-through technologies and prospect for DFIG wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 8-15.
- [2] 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.  
ZHANG Xing, ZHANG Longyun, YANG Shuying, et al. Low voltage ride-through technologies in wind turbine generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2008, 20(2): 1-8.
- [3] 朱晓荣, 刘世鹏. 电网电压不对称跌落时 DFIG 的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 71-78.  
ZHU Xiaorong, LIU Shipeng. A control strategy of DFIG under unbalanced voltage dips[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 71-78.
- [4] 边晓燕, 王本利, 陈建平, 等. 改进的 DFIG 与 VSC-HVDC 协调控制改善风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 9-16.  
BIAN Xiaoyan, WANG Benli, CHEN Jianping, et al. Improvement of low voltage ride through capability of wind farm using coordinated control of the improved DFIG and VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 9-16.
- [5] 赵霞, 王倩, 邵彬, 等. 双馈感应风力发电系统低电压穿越控制策略研究及其分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 57-64.  
ZHAO Xia, WANG Qian, SHAO Bin, et al. Low voltage ride through control strategy and its analysis of doubly fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 57-64.
- [6] 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.  
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.
- [7] 朱晓东, 石磊, 陈宁, 等. 考虑 Crowbar 阻值和退出时间的双馈风电机组低电压穿越[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 84-89.

- ZHU Xiaodong, SHI Lei, CHEN Ning, et al. An analysis on low voltage ride through of wind turbine driven doubly fed induction generator with different resistances and quitting time of Crowbar[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 84-89.
- [8] 蔚兰, 陈宇晨, 陈国呈, 等. 双馈感应风力发电机低电压穿越控制策略的理论分析与实验研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 30-36.
- WEI Lan, CHEN Yuchen, CHEN Guocheng, et al. A low voltage ride-through control strategy of doubly fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 30-36.
- [9] ZHANG Kan, SUN Sujuan. The regulation of grid and motor side converter of DFIG in LVRT[J]. Advanced Materials Research, 2012: 1462-1465.
- [10] 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.
- LIU Xueqing, ZHU Dan, SONG Fei, et al. Feasibility analysis on high voltage ride-through of wind turbines[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(11): 34-38.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T19963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [12] 胡家兵, 贺益康, 王宏胜, 等. 不平衡电网电压下双馈感应发电机转子侧变换器的比例-谐振电流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6): 48-56.
- HU Jiabing, HE Yikang, WANG Hongsheng, et al. Proportional-resonant current control scheme for rotor-side converter of doubly-fed induction generators under unbalanced network voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(6): 48-56.
- [13] LIU Changjin, HUANG Xiaobo, CHEN Min, et al. Flexible control of DC-link voltage for doubly fed induction generator during grid voltage swell[C] // Proceedings of 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE'10). Atlanta, GA, USA: 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE'10), 2010: 3091-3095.
- [14] 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, 36(33): 112-119.
- XU Hailiang, ZHANG Wei, CHEN Jiansheng, et al. A high-voltage ride-through control strategy for DFIG based wind turbines considering dynamic reactive power support[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 36(33): 112-119.
- [15] 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.
- [16] 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.
- LI Junjie, JIANG Kun, LIU Guoping, et al. High voltage ride-through control strategy of doubly-fed induction generator based wind turbines with a series grid-side converter[J]. Power System Technology, 2014, 38(11): 3037-3044.
- [17] 贺益康, 胡家兵, 徐列. 并网双馈异步发电机运行控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [18] 谢振, 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): 39-44.
- 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): 39-44.

收稿日期: 2016-11-16; 修回日期: 2017-03-27

作者简介:

罗少杰(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化及新能源并网控制;

朱玲(1986—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为新能源并网稳定控制。E-mail: zhuling@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)