

基于改进控制策略与动态无功支撑相结合的高电压穿越方法研究

孙丽玲, 王艳娟

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 针对双馈风力发电机高电压穿越问题, 利用 Laplace 变换对电网电压骤升时电磁暂态过渡过程进行分析, 得出定子电流不仅含有直流分量, 还含有工频交流成分, 并通过仿真频谱验证了理论分析的正确性。不同于常规研究中只在转子电压方程考虑定子磁链的动态变化, 而忽略了其对功率外环的影响, 分析了定子磁链动态变化对有功、无功解耦的影响, 在此基础上对功率外环进行传统矢量控制策略的改进。此外, 考虑并网规范对机组无功电流支撑的要求, 控制换流器输出与电网电压骤升幅度相匹配的无功电流, 帮助故障电网快速恢复。仿真结果表明, 该方案不仅能够保证电网电压骤升时双馈机组不脱网运行, 而且也满足并网规范对机组无功电流输出的要求, 实现高电压穿越。

关键词: 高电压穿越; 暂态分析; 功率外环; 换流器; 无功电流支撑

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)05-0035-07

A High-Voltage Ride-Through Control Method Study Based on Improved Control Strategy and Dynamic Reactive Power Support

SUN Liling, WANG Yanjuan

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The electromagnetic transient process under the grid voltage swell was analyzed by Laplace transform. The stator current contained not only the DC component but also the AC component. The results of simulations spectrum verified the correctness of the theoretical analysis. Different from the conventional research only on the rotor voltage equation considering the dynamic changes of stator flux, while ignoring the influence of the outer power, the stator flux dynamic changes of active and reactive power decoupling effect was analyzed. The improved control strategy considering the influence of stator flux linkage dynamics on the power output loop was proposed. And then, the requirement of reactive current support for unit considering the grid specifications, the grid side converter was controlled to output reactive current, which matches the surge margin and grid voltage quickly recovery. The simulation results showed that the proposed control scheme was capable of not only ensuring continuous operation of the DFIG system during the grid voltage swelling conditions, but also satisfying reactive current output requirement, which achieves the high voltage ride through.

Key words: high voltage ride through; transient analysis; power outer loop; converter; reactive current support

作者简介: 孙丽玲(1972—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为大型电机的状态监测与故障诊断。

王艳娟(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为双馈风力发电系统运行。

0 引言

随着风电开发成本的降低和能源需求的增加,风电在能源消费结构中扮演着日益重要的角色。2016 年我国新增风电装机容量 2 337 万 kW, 累计装机容量达 1.69 亿 kW^[1]。“十三五”规划要求,到 2020 年,风电装机规模达到 2.1 亿 kW 以上,风电装备技术创新能力达到国际先进水平^[2]。在风电并网容量快速增加的同时,风电机组的安全稳定运行对系统的影响已不容忽视。其中要求较高、难度较大的当属故障穿越运行,与技术相对成熟且已取得一定研究成果的低电压穿越相比^[3-9],高电压穿越(High Voltage Ride Through, HVRT)这一常见的电网异常现象尚未引起足够的重视。

影响风电场高压脱网的原因主要有:机组因素(动态无功控制策略)、风电场因素(无功补偿装置控制策略)以及电网因素(电网强度、网架结构、脱网比例等)。可见,高电压脱网问题成因复杂,应根据实际的脱网情况采取相应的解决方案,最终形成协调治理措施。对于机组因素,可以进行故障穿越控制策略的改进,或增加硬件设备,或利用机组自身的无功控制能力参与系统无功调节;对于风电场因素,可以校核无功补偿装置容量,根据特定条件实现无功补偿装置的快速投入与切除;对于电网因素,可以增加机组运行过程中对高电压的耐受能力^[10]。

文献[11-12]分别提出了一种基于变阻尼和虚拟阻抗的改进控制策略,在减小故障冲击的同时提高双馈机组的高电压穿越能力。文献[13-14]在电网电压骤升故障下采用滞环控制器替代传统的 PI 调节器,提高系统的动态响应速度。文献[15]采用变直流母线电压控制策略,提高双馈机组的 HVRT 运行效率。然而,上述文献只对传统控制策略进行了改进,并没有考虑电网规范对机组无功电流支撑的要求。因此,为满足日益严格的并网准则,研究电网电压骤升时双馈机组的无功控制能力非常必要。文献[16]提出一种考虑动态无功支撑的双馈风电机组 HVRT 控制策略,但需要依靠直流侧卸荷电路的动作保护配合完成故障穿越。文献[17]分析了电网电压骤升下并网逆变器的可控范围,通过控制并网逆变器

输出感性无功电流,以此减小电网电压的骤升幅度来实现 HVRT,但对所需无功电流没有进行详细说明。对于机组因素造成的高电压脱网问题,现有文献大多都只单纯地进行控制策略改进或只利用机组的无功控制能力改善故障穿越性能,并没有将二者结合起来。

针对以上问题,本文提出一种基于改进控制策略和计及并网规范的动态无功支撑相结合的 HVRT 方法。利用 Laplace 变换对电网电压骤升时电磁暂态过渡过程进行分析,得出定子电流不仅含有直流分量,还含有工频交流成分,仿真频谱验证了理论分析的正确性。在此基础上,不同于常规研究中只在转子电压方程考虑定子磁链的动态变化,提出定子磁链动态变化对有功、无功解耦的影响,对功率外环进行传统矢量控制策略改进。此外,在电网电压骤升期间,控制换流器输出与电网电压骤升幅度相匹配的无功电流,帮助故障电网快速恢复。仿真结果表明,该方案不仅能够确保电压骤升时双馈机组不脱网运行,提高动态响应速度,而且也满足并网规范对机组无功电流输出的要求,实现 HVRT 运行。

1 电压骤升时电磁暂态过程分析

双馈风力发电机(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)定子侧和转子侧均采用电动机惯例,忽略磁饱和现象后在同步旋转坐标系下的电压方程和磁链方程为

$$\begin{pmatrix} U_s \\ U_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + pL_s + j\omega_1 L_m & pL_m + j\omega_1 L_m \\ pL_m + j\omega_s L_m & R_r + pL_r + j\omega_s L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_s \\ I_r \end{pmatrix} \quad (1)$$

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

式中:下标 s、r——定子和转子分量;

U 、 I 、 ψ ——电压、电流、磁链矢量;

R 、 L ——电阻和电感;

ω_1 ——同步旋转角速度;

L_m ——定转子间互感;

ω_s ——转差角速度。

DFIG 转子侧换流器经过坐标变换实现有功、无功解耦控制,进而实现最大风能追踪和风机无冲击并网控制等功能,一般采用功率外环、电流内

环的双闭环矢量控制策略。若 DFIG 转子侧换流器电流内环控制带宽较大、转子电流动态响应速度较快时,可认为在电网电压骤升的电磁暂态过渡过程中,转子电流能够始终跟随其指令值 I_r^* [18]。因此式(1)可简化为

$$\begin{pmatrix} U_s \\ U_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + pL_s + j\omega_1 L_s & j\omega_1 L_m \\ pL_m + j\omega_s L_m & R_r + j\omega_s L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_s \\ I_r^* \end{pmatrix} \quad (3)$$

对式(3)进行 Laplace 变换,可得定子电流、转子电压的相关方程为

$$(R_s + sL_s + j\omega_1 L_s)I_s(s) = U_s(s) - \frac{j\omega_1 L_m I_r^*}{s} + L_s I_s(0_-) \quad (4)$$

$$U_r(s) = L_m [sI_s(s) - I_s(0_-)] + j\omega_s L_m I_s(s) + \frac{R_r I_r^*}{s} + \frac{j\omega_s L_r I_r^*}{s} \quad (5)$$

将式(4)整理为

$$I_s(s) = \frac{1}{D(s)} \left\{ (R_s - j\omega_1 L_s) [U_s(s) + L_s I_s(0_-) - j\omega_1 L_s L_m I_r^*] + sL_s [U_s(s) + L_s I_s(0_-)] - \frac{(R_s - j\omega_1 L_s) j\omega_1 L_m I_r^*}{s} \right\} \quad (6)$$

其中, $D(s) = L_s^2 [(s + R_s/L_s)^2 + \omega_1^2]$ 。

对式(6)进行化简可得:

$$I_s(s) = \frac{1}{D(s)} \left(sc + ab - \frac{d}{s} \right) \quad (7)$$

式中: a, d ——与电机参数相关的常量;

b, c ——包含电网电压变化的量。

a, b, c, d 分别为

$$\begin{cases} a = (R_s - j\omega_1 L_s) \\ b = [U_s(s) + L_s I_s(0_-) - j\omega_1 L_s L_m I_r^*] \\ c = L_s [U_s(s) + L_s I_s(0_-)] \\ d = (R_s - j\omega_1 L_s) j\omega_1 L_m I_r^* \end{cases} \quad (8)$$

对式(7)进行 Laplace 逆变换,可得定子电流在时域坐标系下的表达式为

$$I_s(t) = e^{-t/\tau_s} \left[\cos(\omega_1 t) \frac{c\omega_1^2 \tau_s^2 + d\tau_s^2 + c}{R_s^2(\omega_1^2 \tau_s^2 + 1)} + \sin(\omega_1 t) \frac{ab\omega_1^2 \tau_s^2 + 2d\tau_s + ab}{R_s^2(\omega_1^2 \tau_s^2 + 1)} \right] -$$

$$\frac{d}{R_s^2(\omega_1^2 \tau_s^2 + 1)} \quad (9)$$

其中, $\tau_s = L_s/R_s$ 为定子时间常数。

由式(9)可以看出,在电网电压骤升故障下,定子电流不仅含有直流分量,而且还包含有按定子时间常数衰减的交流分量。根据 Park 变换可知,定子电流的直流分量对应于同步旋转坐标系下的工频交流分量,其交流分量对应于同步旋转坐标系下的暂态衰减直流分量。

图1、图2分别给出了 DFIG 在电网电压骤升的电磁暂态过渡过程中定子电流的 d, q 轴分量及其频谱分析。

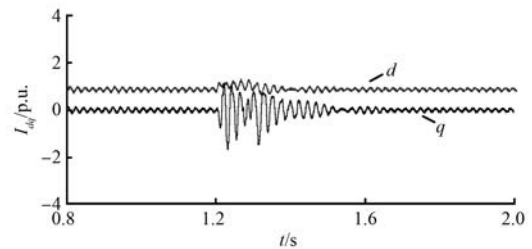


图1 DFIG 定子 d, q 轴电流分量

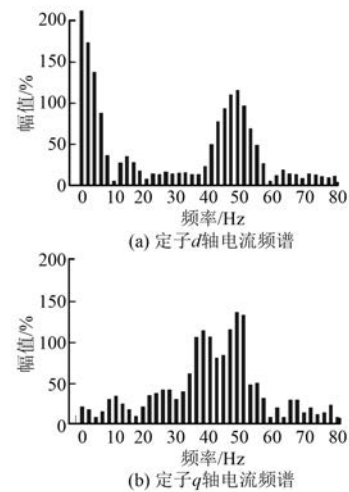


图2 DFIG 定子 d, q 轴电流频谱分析

由图1、图2可以看出,电压骤升故障过程中,定子电流的 d, q 轴分量已不再是单纯的直流分量,还包含交流成分。频谱分析图表明,工频交流成分占主要部分,验证了上述理论推导的正确性。

将式(7)代入式(5),进行 Laplace 逆变换后同理可得转子电压方程的时域表达式。由于定、转子绕组间的强耦合关系,电磁暂态过渡过程中,定子绕组中的直流分量在转子绕组中产生一个转速频率 ω_r

的交流分量。图3所示为电网电压骤升故障的电磁暂态过渡过程中转子电压 d, q 轴分量的频谱分析, 可以看出, 转速频率的交流成分占主要部分。

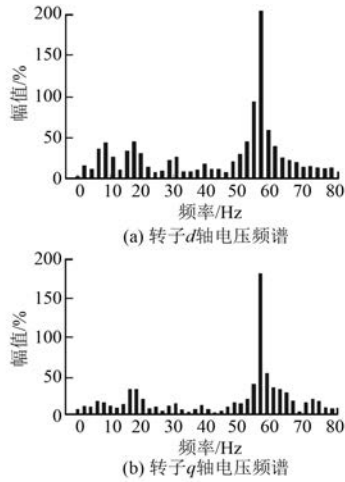


图3 DFIG 转子 d, q 轴电压频谱分析

2 改进控制策略

在 $t=t_0$ 时, 电网电压骤升, 电压突变前后定子电压方程为

$$U_s = \begin{cases} U_s e^{j\omega_1 t} & t < t_0 \\ (1+d)U_s e^{j\omega_1 t} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: d ——电网电压骤升幅度。

电网电压骤升所引起的电磁暂态过渡过程中, 由于定子磁链不能突变, 所以此时的定子磁链由稳态分量和暂态衰减分量组成。定子磁链的稳态分量以同步角速度 ω_1 逆时针旋转, 幅值与此时电网电压成正比; 定子磁链的暂态衰减分量是为了确保定子磁链连续而产生的, 随定子磁链衰减时间常数按指数规律变化。由此可得电网电压骤升故障前后定子磁链方程为

$$\psi_s = \begin{cases} \frac{U_s}{j\omega_1} e^{j\omega_1 t} & t < t_0 \\ \frac{(1+d)U_s}{j\omega_1} e^{j\omega_1 t} - \frac{dU_s}{j\omega_1} e^{-t/\tau_s} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (11)$$

采用定子电压定向矢量控制策略, 在电网电压正常时, $\psi_{sd} = 0, u_{sq} = 0$, 认为 $L_m \approx L_s$, 由式(2)可得定、转子电流关系为

$$\begin{cases} i_{sd} = -i_{rd} \\ i_{sq} = \frac{\psi_{sq}}{L_s} - i_{rq} \end{cases} \quad (12)$$

由定子功率表达式 $P_s + jQ_s = -3/2 U_s \hat{I}_s$, 此时定子有功功率和无功功率分别为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} u_{sd} i_{rd} \\ Q_s = \frac{3}{2} u_{sd} \left(\frac{\psi_{sq}}{L_s} - i_{rq} \right) \end{cases} \quad (13)$$

电网电压骤升故障时定子磁链发生变化, 此时 $\psi_{sd} = 0, u_{sq} = 0$ 不再成立, 定子有功功率和无功功率变为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} \left[u_{sd} i_{rd} - u_{sq} \left(\frac{\psi_{sq}}{L_s} - i_{rq} \right) \right] \\ Q_s = \frac{3}{2} \left[u_{sd} \left(\frac{\psi_{sq}}{L_s} - i_{rq} \right) + u_{sq} i_{rd} \right] \end{cases} \quad (14)$$

比较式(13)和式(14), 可以看出, 考虑电网电压骤升时定子磁链的动态变化, 有功功率和无功功率分别增加了 $-u_{sq} \left(\frac{\psi_{sq}}{L_s} - i_{rq} \right)$ 、 $u_{sq} i_{rd}$ 。显然,

这两项在电网电压骤升故障时不能简单忽略。然而, 现有文献大多都只在电流内环的转子电压方程中考虑定子磁链的动态变化, 而忽略了对功率外环的影响, 致使转子侧控制电压增大, 且对直流母线电压的稳定没有太大改善作用。

通过上述分析, 在电网电压骤升故障时, 本文考虑定子磁链的动态变化对功率外环的影响, 将 $-u_{sq} \left(\frac{\psi_{sq}}{L_s} - i_{rq} \right)$ 和 $u_{sq} i_{rd}$ 作为功率外环的前馈补偿分量对传统矢量控制策略进行改进。改进后的转子侧换流器控制框图如图4所示。

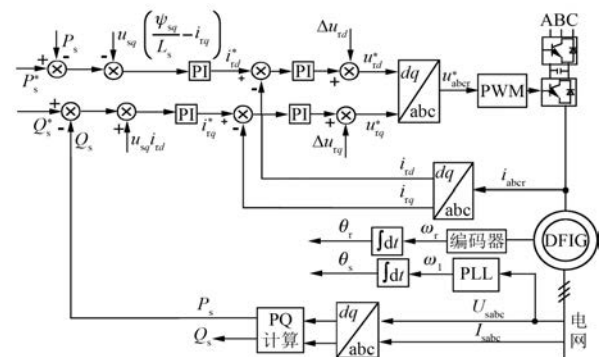


图4 转子侧换流器改进控制策略

3 计及并网规范的无功电流配置

图5所示为网侧换流器电网连接示意图, 忽

略进线电阻后,网侧换流器的稳态电压方程为

$$\mathbf{V}_g = \mathbf{U}_g - \mathbf{V}_L \quad (15)$$

式中: $\mathbf{U}_g$ ——电网电压向量;

$\mathbf{V}_g$ ——网侧换流器输出电压向量;

$\mathbf{V}_L$ ——进线电感电压向量, $\mathbf{V}_L = j\omega_1 L_g \mathbf{I}_g$;

$\mathbf{I}_g$ ——网侧换流器输入电流向量;

L_g ——进线电感。

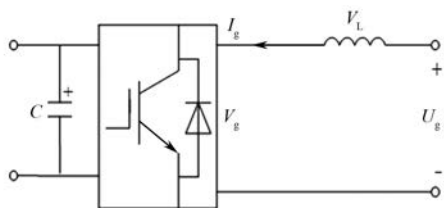


图5 网侧换流器电网连接示意图

网侧换流器采用电网电压定向矢量控制时,式(15)可写为

$$\begin{cases} V_{gd} = U_{gd} + \omega_1 L_g I_{gq} \\ V_{gq} = -\omega_1 L_g I_{gd} \end{cases} \quad (16)$$

由于换流器交流侧输出电压受直流母线电容额定工作电压的限制,在采用电压空间矢量调制方式下,网侧换流器处于可控状态的前提是直流母线电压 U_{dc} 与换流器输出电压满足如下约束关系:

$$U_{dc} > \sqrt{3} V_g \quad (17)$$

将式(16)、式(17)联立,可得直流母线电压与电网电压关系为

$$U_{dc} > \sqrt{3[(U_{gd} + \omega_1 L_g I_{gq})^2 + (-\omega_1 L_g I_{gd})^2]} \quad (18)$$

在电网电压正常时,网侧换流器工作于单位功率因数状态,此时直流母线电压在允许的安全限值内。但当电网电压骤升,仍维持单位功率因数运行,直流母线电压大幅度提高,此时,直流母线电容电压超过其允许的电压安全限值,这是换流器直流侧所不允许的。因此,在电网电压骤升期间,可通过控制换流器吸收感性无功电流。一方面可以为电网提供感性无功支撑,帮助故障电网快速恢复;另一方面,改变网侧进线电感上的电压相量,利用电感的分压作用减小换流器直流侧以及功率器件所承受的电压远小于电网电压,以此维持直流母线电压的稳定,使其正常工作。依据现有 DFIG 参数,网侧进线电感上可获得 0~

10% 的并网点电压^[19]。

根据式(18)可得无功电流的最小值为

$$I_{gq_min} = \frac{1}{\omega_1 L_g} [\sqrt{U_{dc}^2/3 - (-\omega_1 L_g I_{gd})^2} - U_g] \quad (19)$$

电网电压骤升时无功电流主要取决于电网电压骤升幅度,换流器输出有功电流对其影响几乎可以忽略^[16],因此式(19)可简化为

$$I_{gq_min} = \frac{1}{\omega_1 L_g} (U_{dc}/\sqrt{3} - U_g) \quad (20)$$

根据德国 E.ON 公司高电压穿越并网规范,在并网点电压骤升至 1.1 倍标么值及以上时,电网电压每升高 1%,至少要提供 2% 的感性无功电流。由于网侧换流器已经输出了部分无功电流,所以定子侧输出的无功电流需满足:

$$I_{sq} \leq [-2(U_s - 1.1)I_N - I_{gq}] \quad (21)$$

式中: I_N ——额定电流。

结合式(12),可知此时转子侧换流器需输出的无功电流 I_{rq} 为

$$I_{rq} \geq \frac{L_s}{L_m} [2(U_g - 1.1)I_N + I_{gq}] - \frac{U_g}{\omega_1 L_m} \quad (22)$$

通过上述分析可知,式(20)和式(22)共同构成了 HVRT 过程中网侧和转子侧换流器无功电流的给定。

4 仿真分析

基于 MATLAB/Simulink 仿真平台,搭建改进控制策略下 DFIG 的仿真模型。其中双馈感应发电机参数为:额定功率 1.5 MW、定子额定线电压 575 V、直流母线额定电压 1 200 V、额定频率 50 Hz、极对数 3、定子电阻 0.007 06 p.u.、转子电阻 0.005 p.u.、定子漏感 0.171 p.u.、转子漏感 0.156 p.u.、定转子间的互感 2.9 p.u.、故障前 DFIG 转速 1.2 p.u.,在故障期间风速保持恒定。

4.1 改进控制策略仿真分析

图 6 对比了采用传统控制策略、计及定子磁链动态变化对电流内环影响的改进控制策略以及本文提出的考虑定子磁链动态变化对功率外环影响的改进控制策略下直流母线电压的动态响应。

采用考虑定子磁链动态变化对功率外环影响的改进控制策略时,转子侧换流器馈入的有功功率的减小,能够最小化直流母线电压的波动,提高

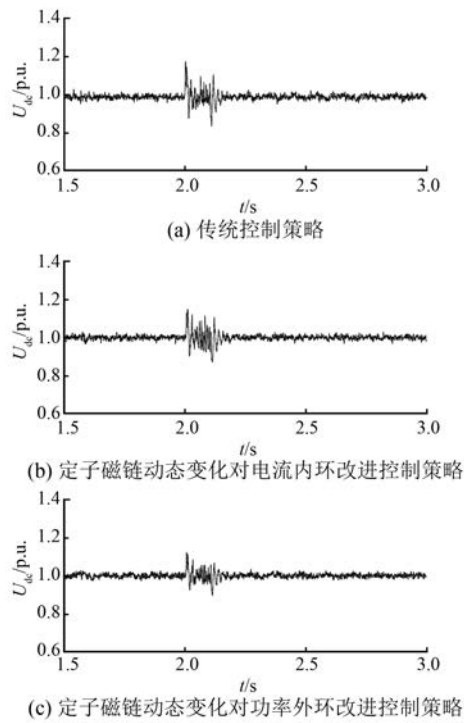


图6 直流母线电压瞬态响应

直流母线电压的稳定性。

表1给出了3种控制策略下转子电压的大小,可以看出本文所提出的控制策略可以最大程度减小转子电压。

表1 不同控制策略下转子电压对比

控制策略	正常转子电压/p.u.	故障转子电压/p.u.
传统控制策略	0.713	0.731
对电流内环改进	0.713	0.728
对功率外环改进	0.713	0.724

4.2 仿真分析

图7、图8分别给出了传统控制策略和本文所提的改进控制策略与动态无功支撑相结合控制策略下无功功率和并网点电压的波形。

由无功功率的波形可以看出,在电网电压骤升过程中,采用改进的控制策略较传统控制策略能够输出更多的感性无功功率,避免系统无功过剩,且并网点电压有所下降,更有利于故障电网的快速恢复,在整个HVRT过程中,风电机组并未脱网运行。

5 结 语

本文针对DFIG高压脱网问题,提出一种基

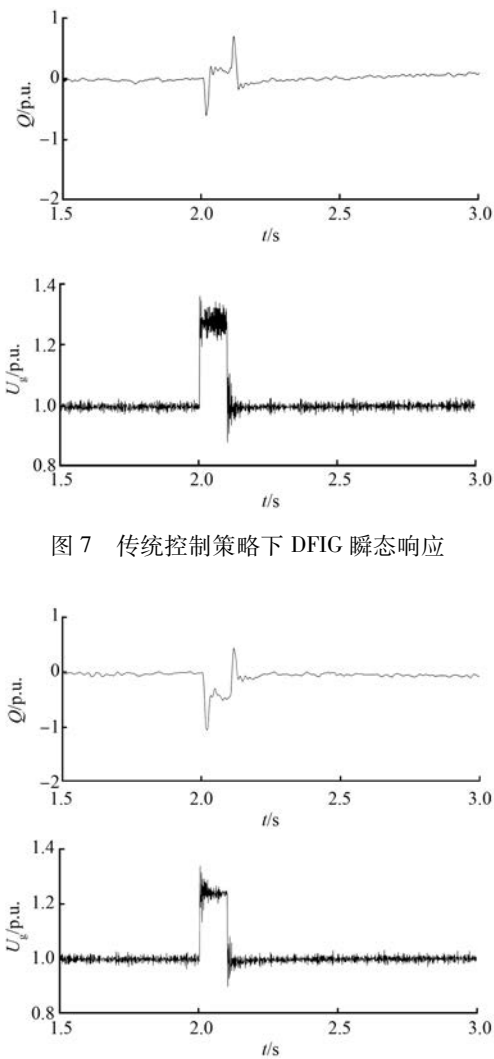


图8 改进控制策略下DFIG瞬态响应

于改进控制策略与动态无功支撑相结合的HVRT方法。分析了电网电压骤升时电磁暂态过渡过程,仿真频谱验证了定子电流不仅包含直流分量,还包含有工频交流分量;根据定子磁链对有功、无功解耦的影响,对功率外环进行控制策略的改进,能够最小化直流母线电压的波动,提高直流母线电压的稳定性。考虑电网规范对机组无功电流支撑的要求,控制换流器输出与电网电压骤升幅度相匹配的无功电流,使DFIG工作于无功支持模式,实现电网电压的快速恢复。仿真结果表明,该方案不仅能够保证电网电压骤升时双馈风机不脱网运行,而且也满足并网规范对机组无功电流输出的要求,实现高电压故障穿越。本文对双馈机组HVRT运行研究及控制策略的制定具有借鉴意义。

【参考文献】

- [1] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2016 年中国风电装机容量统计[J]. 风能, 2016(2): 32-44.
- [2] 中国可再生能源学会风能专业委员会.《可再生能源发展“十三五”规划》印发[J]. 风能, 2016(12): 16.
- [3] 蒋雪冬, 赵航. 应对电网电压骤降的双馈感应风力发电机 Crowbar 控制策略[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 84-89.
- [4] 操瑞发, 朱武, 涂祥存, 等. 双馈式风力发电系统低电压穿越技术分析[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 72-77.
- [5] 贺益康, 胡家兵. 双馈异步风力发电机并网运行中的几个热点问题[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 1-15.
- [6] 张建忠, 熊良根, 杭俊, 等. DFIG 风电机组串联耦合补偿低电压穿越研究[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 67-72.
- [7] WEISE B. Impact of K-factor and active current reduction during fault-ride-through of generating units connected via voltage-sourced converters on power system stability [J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 9(1): 25-36.
- [8] 刘巨, 姚伟, 候云鹤, 等. 一种储能改善低电压穿越期间风电场注入电流特性的致稳策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 93-103.
- [9] 刘璐, 耿华, 马少康, 等. 低电压穿越过程中 DFIG 型风电场同步稳定及无功电流控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 1-9.
- [10] 赵宏博, 姚良忠, 王伟胜, 等. 大规模风电高电压脱网分析及协调预防控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 43-48.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] LIU C J, HUANG X B, CHEN M, 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.
- [16] 徐海亮, 章玮, 陈建生, 等. 考虑动态无功支撑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): 112-120.
- [17] 郑重, 耿华, 杨耕. 新能源发电系统并网逆变器的高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1463-1472.
- [18] 王勇, 张纯江, 柴秀慧, 等. 电网电压跌落情况下双馈风力发电机电磁过渡过程及控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 14-19.
- [19] 李少林, 王伟胜, 王瑞明, 等. 双馈风电机组高电压穿越控制策略与试验[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 76-82.

收稿日期: 2017-11-20

(上接第 24 页)

- [10] 张秋瑞. 城市轨道交通再生制动能量利用技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [11] BARKER P P. Ultracapacitors for use in power quality and distributed resource applications [C] // Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, 2002: 316-320.
- [12] 谭欣, 刘沛津. 基于电信号融合的电机运行状态在线识别技术[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2015(11): 71-73.
- [13] TAKEUCHI K. Drive regenerative control system; US 7436137B2 [P]. 2008.
- [14] 苏成贵, 范志华, 钟文才, 等. 三相交流电动机智能测控系统的研究[J]. 价值工程, 2012, 31(18): 36-37.
- [15] 陆治国, 祝万平, 刘捷丰, 等. 一种新型交错并联双向 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 39-46.

收稿日期: 2017-11-20