

储能型双馈风电场联合 STATCOM 的 无功协调控制

王 鹏¹, 李方媛¹, 胡 阳¹, 郭 浩², 朱 琳³

- [1. 东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室, 吉林 吉林 132012;
2. 内蒙古电力(集团)有限责任公司呼和浩特供电局, 内蒙古 呼和浩特 010000;
3. 国家能源投资集团有限责任公司邯郸热电厂, 河北 邯郸 056004]

摘 要: 针对传统双馈风电机组(DFIG)低电压穿越(LVRT)能力不足问题,提出了储能型双馈风电场联合 STATCOM 的无功协调控制。该控制是在网侧变流器(GSC)原有的模型上将超级电容经隔离型 DC/DC 变换器并联到风机直流侧,以此吸收故障期间直流侧产生的不平衡功率;在发生低电压故障时,根据超级电容投入情况,对两侧变流器和并联在风机出口母线上的 STATCOM 进行无功协调控制来支撑电网电压;同时超级电容储能装置采用电压电流双闭环控制,满足了系统稳定性和经济性的要求。仿真结果表明:该方法应用在风电并网系统中可以使 DFIG 的 LVRT 能力得到极大的提升。

关键词: 改进型双馈风机; 静止同步补偿器; 无功协调控制; 超级电容

中图分类号: TM 315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)02-0064-07

doi: 10.12177/emca.2020.194

Coordinated Reactive Power Control of Energy Storage Doubly-Fed Wind Farm Combined with STATCOM

WANG Peng¹, LI Fangyuan¹, HU Yang¹, GUO Hao², ZHU Lin³

- [1. The Key Laboratory of Modern Power System Simulation Control and Green Power New Technology of Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;
2. Hohhot Power Supply Bureau of Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Hohhot 010000, China;
3. Handan Power Plant of China Energy Investment Corporation, Handan 056004, China]

Abstract: The low voltage ride through (LVRT) capability of traditional doubly-fed induction generator (DFIG) is insufficient. To solve this problem, the coordinated reactive power control of energy storage type doubly-fed wind farm combined with static compensator (STATCOM) is proposed. The control is based on the original model of the DFIG, and connects the super capacitor in parallel to the DC side of the wind turbine via an isolated DC/DC converter. As a result, the control can absorb the unbalanced power generated on the DC side during the fault. In the event of a low voltage failure, according to the input of super capacitor, coordinated reactive power control performs on the converter on both sides and the STATCOM connected in parallel on the outlet bus of the wind turbine to support the grid voltage. At the same time, the super capacitor energy storage device adopts voltage and current double-closed-loop control, which can meet the requirements of system stability and economy. Simulation results show that the proposed control in the wind power grid-connected system can greatly improve LVRT capability of DFIG.

Key words: improved doubly-fed induction generator (DFIG); static compensator (STATCOM); coordinated reactive power control; super capacitor

收稿日期: 2020-10-10; 收到修改稿日期: 2020-12-21

作者简介: 王 鹏(1995—),男,硕士研究生,研究方向为含有 FACTS 的风电系统并网运行稳定性。

0 引言

风电在电力系统中渗透率日益增高,电网对风电机组运行特性的要求也在不断提升^[1-5]。要求并网的风电机组必须具有良好的低电压穿越(LVRT)能力^[6]。风电机组在电网发生低电压故障时间范围内不仅不允许脱网运行,而且在故障期内还要向电网提供一定的无功功率支撑电网电压^[6-7]。双馈异步风电机组在低电压故障时面临2个主要难题:(1)低电压故障时直流侧母线过电压;(2)转子过电流烧毁变流器导致风机脱网运行。

目前,风机提高 LVRT 能力,主要是从改进控制策略和增加硬件控制电路结合的办法来弥补二者单独控制时的不足^[8-11]。文献[12]利用超导储能元件并联到直流侧以实现瞬态功率的存、放功能,但是该策略在故障期间没有对无功功率进行控制,不能较好实现 LVRT。文献[13]采用转子 Crowbar 电路和 DC-chopper 电路,并且通过改进网侧变流器(GSC)无功控制来完成双馈风机(DFIG)的 LVRT,此方法中由于直流侧过压的能量被卸荷电路消耗,造成了风机有功输出恢复减慢,不利于系统有功恢复。风电场通常装有动态的无功补偿设备来确保风电机组稳定运行以及电网安全稳定^[14]。文献[15]研究了 STATCOM 对改善 DFIG 暂态电压稳定性,在故障期间能抑制电压跌落程度,使电网低电压故障后电压得到有效恢复。文献[16]针对电网故障导致储能系统保护投入期间,风电场内 DFIG 转子侧换流器与超导储能协调控制问题进行了研究。文献[17-19]针对电网发生低电压故障时,Crowbar 保护电路投入期间,没有对 DFIG 机侧变流器、GSC 与无功补偿元件间的无功协调控制问题进行分析。

本文在电网故障导致电压跌落程度不同的情况下,针对改进型 DFIG 超级电容储能系统、机侧变流器、网侧换流器、STATCOM 间的协调控制进行了研究,提出了风电场根据不同的跌落程度,DFIG GSC 与无功补偿元件 STATCOM 间的优先无功功率分配原则及无功电压协调控制策略,当电网电压跌落较深超级电容投入时 DFIG 两侧变流器与 STATCOM 共同实现对系统的无功支撑,从而促进故障后电网电压的快速恢复。

1 DFIG 的改进模型

1.1 改进的 DFIG 模型

DFIG 能进行能量双向流动的基础是直流侧电压动态性能的稳定。当电网出现故障时,风机向电网输送的有功功率 P_A 随之减少,直流电容两侧的变流器存在严重不平衡功率就会造成直流母线电压出现大范围的波动,严重时烧毁变流器使风机脱网运行。

DFIG 在稳定运行时 $P_g = P_r$, 直流侧电压稳定,此时直流侧电压可表示为

$$C_{dc} U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = P_g - P_r \quad (1)$$

式中: U_{dc} 、 C_{dc} 为直流侧母线电压和直流电容; P_g 为直流侧向 GSC 输出的瞬时有功; P_r 为机侧变流器流向直流侧输出的瞬时有功。

转子侧和 GSC 的不平衡功率是造成直流侧过电压的根本原因,因此提出超级电容经隔离型 DC/DC 变换器连接到直流侧的控制方案,以此来平衡不平衡功率。

本文在改进传统双馈机组模型的基础上来分析变流器和 STATCOM 的协调控制。当电网故障导致直流侧电压变化时,超级电容储能系统起到快速蓄能或消耗多余能量的作用,解决直流侧电压过高或过低产生的能量不匹配问题。

图 1 为带有超级电容的 DFIG 发电系统。

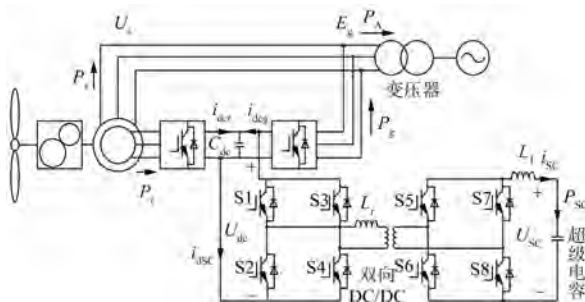


图 1 带有超级电容的 DFIG 发电系统

图 1 中, U_{sc} 为低压侧超级电容两端的电压。变换器先进行脉宽调制(PWM)移相控制,再进行不控整流,对超级电容充电模式时, S1~S4 工作在逆变状态, S5~S6 处于整流状态。变换器处于 Boost 时, S5~S8 工作在逆变状态。利用隔离变压器进行能量传送,且该直流变换器很容易实现软

开关,具有较高的系统转换效率。

加入超级电容后直流侧的电压表达式为

$$\frac{1}{2}C_{dc} \frac{dU_{dc}^2}{dt} = P_g - P_r + P_{sc} \quad (2)$$

1.2 超级电容的数学模型

超级电容功率密度大,因此充放电速度快且具有温度特性好、单位时间释放能量大、受环境温度影响小、节能环保、易于维护保养等特点,因此选择超级电容作为储能元件。由于超级电容的物理特性十分复杂,蓄能过程中每个单体的多孔电极均会呈现出不同的工作特性。为了便于分析,忽略低频下作用不明显的电感和漏电流,只考虑瞬时动态响应,由串联理想电容 C_{sc} 和等效电阻 R_{sc} 组成简化经典模型。

图2为超级电容等效电路模型。其吸收或释放的能量受到外部电压影响:

$$P_{sc} = nmC_f(U_1^2 - U_2^2) \quad (3)$$

式中: n 、 m 为串联、并联电容的个数; C_f 为单个电容; U_1 、 U_2 分别为超级电容的初始电压、状态电压。

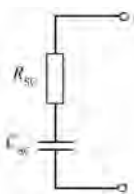


图2 超级电容等效模型

2 风机变流器的控制

2.1 转子侧变流器无功功率优先控制

风机输出的无功功率受转子侧变流器(RSC)电流的值限制,风机发出的无功在RSC允许通过最大电流限制的条件下有:

$$\left(\frac{L_s}{L_m} \frac{2}{3U_s} P_s\right)^2 + \left(\frac{L_s}{L_m} \frac{2}{3U_s} Q_s + \frac{U_s}{\omega_0 L_m}\right)^2 = i_r^2 \leq I_{rmax}^2 \quad (4)$$

式中: L_s 、 L_m 为定子、励磁绕组的等效电感; U_s 为DFIG定子的电压; P_s 、 Q_s 为风机定子侧输出有功与无功; ω_0 为角频率; i_{rmax} 为机侧变流器允许通过电流的最大值。

整理式(4)可得:

$$P_s^2 + \left(Q_s + \frac{3U_s^2}{2X_s}\right)^2 \leq \left(\frac{3X_m}{2X_s} U_s I_{rmax}\right)^2 \quad (5)$$

式中: X_s 、 X_m 为定子侧的自阻抗、互阻抗。

在有功功率 P_s 确定的情况下,无功功率调节范围为

$$\begin{cases} Q_{smin} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} - \sqrt{\left(\frac{3X_m}{2X_s} U_s I_{rmax}\right)^2 - P_s^2} \\ Q_{smax} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} + \sqrt{\left(\frac{3X_m}{2X_s} U_s I_{rmax}\right)^2 - P_s^2} \end{cases} \quad (6)$$

DFIG RSC 在电网电压正常水平时输出的无功为零。电网发生短路时,超级电容储能系统平衡了低电压故障时直流电容两侧的不平衡功率,因此在储能系统投入时,机侧变流器可以进行无功控制,优先确定无功功率再确定有功,提高风机故障期间无功发出能力。机侧变流器控制策略如图3所示。

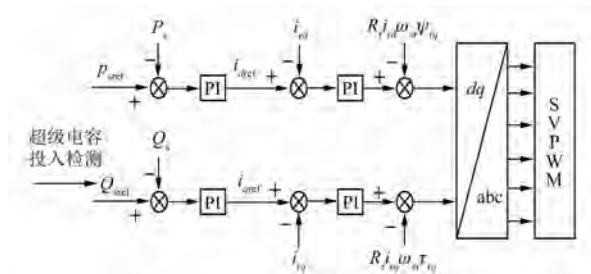


图3 机侧变流器控制策略

2.2 含超级电容的 DC/DC 变换器的控制

当直流电压超过给定值时,变换器应工作在 Buck 模式下吸收直流侧不平衡功率并储存;超级电容释放储存的能量时,变换器应转变为 Boost 模式,将超级电容故障期间存储的能量输出至直流侧,使直流电压升高至稳定范围。

如图4所示,隔离型全桥 DC/DC 变换器对超级电容端电压 U_{sc} 、直流母线电压 U_{dc} 以及超级电容电流 i_{sc} 进行电压电流双闭环控制。当变换器处在 Boost 放电模式下, U_{sc} 作为电压外环, i_{sc} 为电流内环进行双闭环 PI 控制。

2.3 GSC 的控制策略

GSC 正常情况下运行在单位功率因数模式下,维持直流侧电压的稳定且输出有功为额定值。电网发生短路故障造成电压跌落时,需要 GSC 进行无功功率控制。GSC 容量一般按照风电机组的

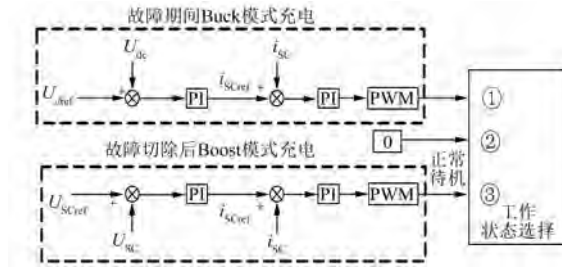


图4 变换器的控制策略

最大转差功率设计其无功极限：

$$-\sqrt{S_g^2 - P_g^2} \leq Q_g \leq \sqrt{S_g^2 - P_g^2} \quad (7)$$

式中： S_g 为 GSC 容量； P_g 、 Q_g 分别为 GSC 发出的有功功率和无功功率。

GSC 采用超级电容电流协调控制来平衡电能,实现输出有功的快速恢复,将超级电容电流作为前馈引入到网侧控制中,如图5所示。

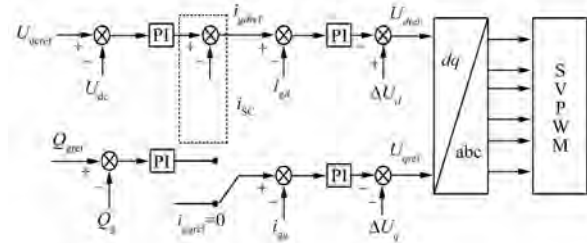


图5 GSC控制策略

3 STATCOM 的基本分析

STATCOM 作为无功补偿元件通常并联在风电场母线上,通过提供或吸收感性无功功率维持风电场母线电压稳定。

图6为STATCOM结构。

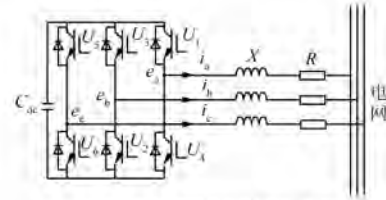
由图6可知,STATCOM 吸收的电流为

$$I = \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_1}{jX} \quad (8)$$

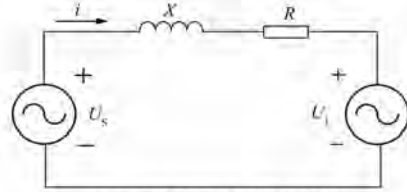
STATCOM 吸收的有功功率和无功功率为

$$\begin{cases} P = \frac{U_s U_1 \sin \alpha}{X} \\ Q = \frac{U_s (U_s - U_1 \cos \alpha)}{X} \end{cases} \quad (9)$$

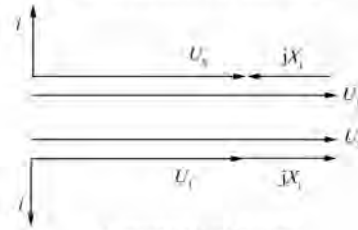
式中： X 为连接电抗器的电抗； α 为电网电压矢量 U_1 相对于 STATCOM 交流侧电压矢量 U_s 的相角差。



(a) STATCOM并网结构图



(b) STATCOM并网等效电路



(c) STATCOM补偿原理

图6 STATCOM 结构

忽略 STATCOM 的各种损耗及对有功功率的影响,可得:

$$Q = \text{Im} \left(\dot{U}_s \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_1}{-jX} \right) = \frac{U_s - U_1}{X} U_s \quad (10)$$

STATCOM 控制框图如图7所示。 d 轴电压外环是基于直流电压参考值 U_{dref} 与实际 U_{dc} 差值然后通过 PI 控制器构成。而对于 q 轴电压外环而言,主要是基于并网点所对应的无功输出参考值即 Q_{sref} ,继而得到 i_{qref} 和实际反馈值 i_q 的差值,以输出相应的无功功率。

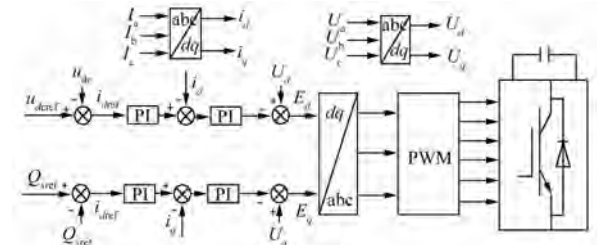


图7 STATCOM 控制框图

4 超级电容与 STATCOM 联合改善风机 LVRT 能力

应用超级电容储能系统能够平稳变流器直流

母线电压,但通过损失有功发出量增加 DFIG 无功发出量,在电压故障跌落强度不深时功率会严重波动,影响电网的稳定运行。因此,DFIG 投入超级电容储能只适合电网电压跌落较深的情况。综上所述,投入超级电容的 DFIG 与无功补偿器均可以向电网发出一定量的无功,因此研究低电压故障时投入超级电容的 DFIG 与无功补偿器联合投入应用,并且协调无功功率发出量。

图 8 为双馈风电场无功电压协调控制框图。

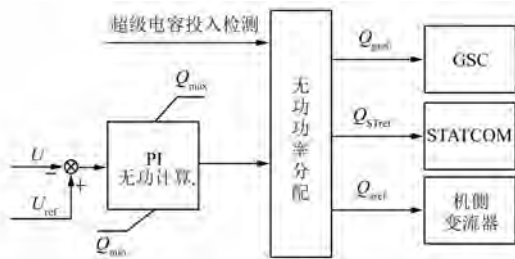


图 8 双馈风电场无功电压协调控制框图

图 8 中,风机在 LVRT 过程中需要提供的无功功率 Q_{ref} 可以由电压控制点参考电压 U_{ref} 实际电压 U 经 PI 计算得到。其无功分配制定的准则因 GSC 无功响应速度较快,优先利用 DFIG GSC 无功功率,无功缺额根据超级电容保护是否投入的情况在 DFIG 定子侧及 STATCOM 之间进行分配。

当并网点电压降低到额定电压 k_D 倍时(即并网点电压为 k_D p. u.),电压跌落程度不是特别低,DFIG 系统自身即可实现 LVRT,因此超级电容与 STATCOM 均不需要投入。当并网点电压跌落到额定电压的 k_D p. u. 以下时,为了风机系统的稳定运行,则要投入 STATCOM 使其对并网点进行无功功率补偿,提高其并网点额定电压的效果为 k_s p. u.。当并网点额定电压在 k_{ss} p. u. 以下时,超级电容和机侧变流器需要投入。根据关系可得:

$$k_{ss} = k_D - k_s \quad (11)$$

其中, k_D 根据风机低电压承受能力得出, k_s 根据 STATCOM 对风机低电压补偿效果得出,在本文中, k_D 取值 0.9, k_s 取值 0.25,则可得 k_{ss} 为 0.65。

超级电容保护未投入时,先由 STATCOM 提供无功缺额;超级电容保护动作时,由于超级电容稳定了直流侧的电压,定子侧工作在无功功率优先控制向电网提供无功支撑。

图 9 为无功协调分配流程图。

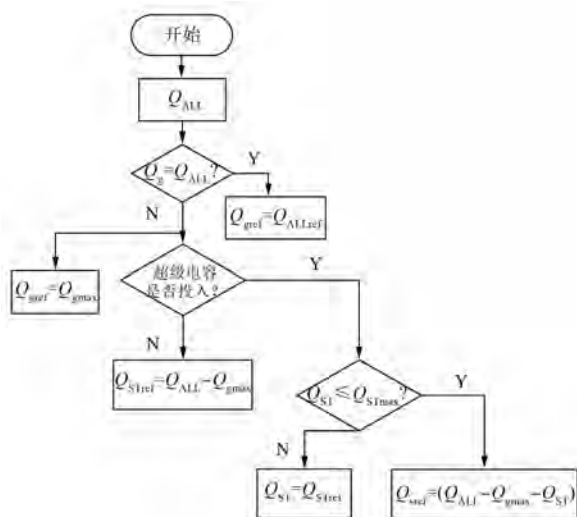


图 9 无功协调分配流程图

图 9 中, Q_s 为 DFIG 定子侧发出的无功功率, Q_g 为 GSC 发出的无功功率, Q_{ST} 为 STATCOM 发出的无功功率, Q_{STmax} 为 STATCOM 的无功容量极限值。

5 仿真分析

5.1 仿真建模

利用 MATLAB/Simulink 搭建整体仿真模型,拓扑结构如图 10 所示。风电场由 6 台 DFIG 组成。DFIG 的额定功率为 1.5 MW,额定风速为 12 m/s,稳定运行时直流母线电压为 1.15 kV。在结合风电场容量及实际需求的基础上,将 STATCOM 装配公共并网点处,其额定容量为 3 MVA。

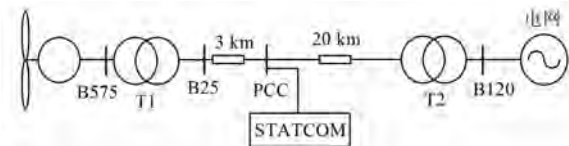


图 10 仿真模型拓扑结构图

5.2 仿真分析

电网电压跌落 30%,超级电容不投入情况下的传统控制、联合控制和协调控制时系统仿真波形如图 11 所示。

3.0 s 时电网电压跌落至 0.7 p. u.,由图 11(b)可以看出,风机运行在传统控制模式下, GSC 处于单位功率因数模式下,故障期间向系统

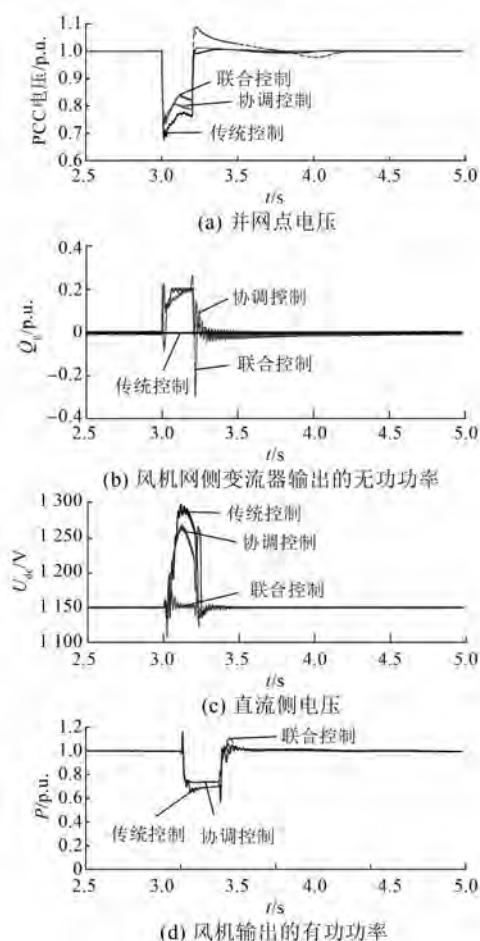


图 11 电压跌落不严重时仿真波形

注入的无功功率为零,在联合控制中,风机 GSC 向电网注入了无功功率,支撑了并网处的电压,比传统控制下 PCC 电压提升了约 0.06 p. u.,在协调控制策略中 DFIG 注入电网 0.2 p. u. 的无功功率,在故障切除后比联合控制电压波动小。在故障切除后采用协调控制时,电压迅速回归至在稳定范围内。图 11(c)的联合控制中当直流侧电压超过给定值时超级电容投入吸收直流侧的不平衡功率,协调控制下超级电容没有投入运行,直流侧电压虽然达到了 1 265 V,但仍处于允许的范围。与传统控制相比,图 11(d)中联合控制和协调控制在故障期间均有利于风机有功功率的输出。联合控制中在故障切除以后,超级电容释放电能的过程中造成了输出有功功率的波动,而协调控制策略更加有利于系统的稳定运行。

电网电压跌落 80%,超级电容投入情况下的传统控制、联合调控制和协调控制时系统仿真波

形如图 12 所示。

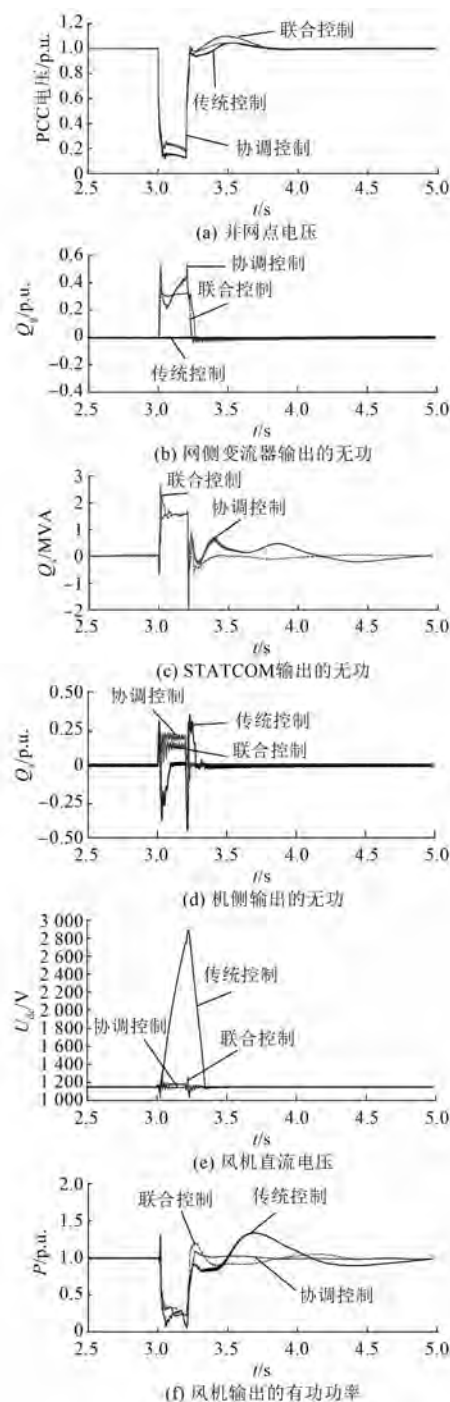


图 12 电压跌落严重时仿真波形

3.0 s 时并网处的电压跌落至 0.16 p. u.,此时电压严重下降,协调控制策略中超级电容储能系统应处于投入状态,图 12(b)的协调控制策略中 GSC 能根据并网要求,处于无功补偿模式对系统进行无功支撑,协调控制中能够根据系统的无功

要求进行补偿,故障期间 GSC 向电网输出约为 0.4 p. u. 的无功功率,而且在故障切除后依旧输出无功功率,PCC 处电压得到了有效的恢复;从图 12(c)可以看到,故障期间 STATCOM 也向系统注入 1.5 Mvar 的无功功率,与联合控制相比,能向系统输入稳定的无功电流。其中,机侧变流器在无功功率不足时也向系统注入无功电流(工作在有功受限,无功优先控制模式下)向系统注入约为 0.18 p. u. 的无功功率。通过图 12(a)可以看出,协调控制策略比传统的控制模式和联合控制能更有效支撑故障期间的电压,故障切除后电压迅速地恢复至稳定值。图 12(e)为三种控制方式下的直流电压响应,由于超级电容储能系统的投入及协调控制下的无功功率控制,协调控制下的直流侧过电压抑制效果最为明显。从图 12(f)可以看出,风机输出的有功功率在故障期间严重下降,而采用协调控制策略时,故障期间提高了风机输出有功的能力,且风机在故障切除后有功恢复较快且比较平稳。

由图 13(a)中转子转速的响应曲线可以看出,协调控制与传统控制、联合控制相比,抑制转速上升效果明显,其中采用协调控制策略时转速最大为 1 244 r/min,比传统控制的 DFIG 降低了 16 r/min。图 13(b)表示转子暂态电流的响应,传统控制方式下,故障瞬间,转子的冲击电流达到 3.5 p. u.,极不利于风电机组的稳定运行。然而,在所提控制方案下,转子暂态冲击电流约为 2.5 p. u.,与传统控制相比,降低了 28.6%。图 13(c)为超级电容的电流,可以看到超级电容充电过程(充电电流约为 300 A)和放电过程,这也证明了变换器控制策略的正确性。

6 结 语

本文在改进型 DFIG 模型的基础上,改进了 DFIG 两侧变流器的控制策略,使其当电网发生短路故障造成 PCC 电压跌落时,从单位功率因数模式迅速转换到无功补偿模式提供稳定的无功支撑。直流侧储能系统将风机直流母线电压控制在允许范围内。采取了 DFIG 和 STATCOM 之间的协调控制策略能充分利用 DFIG 的无功调节能力,提升了并网点电压稳定性和风机故障穿越能力。

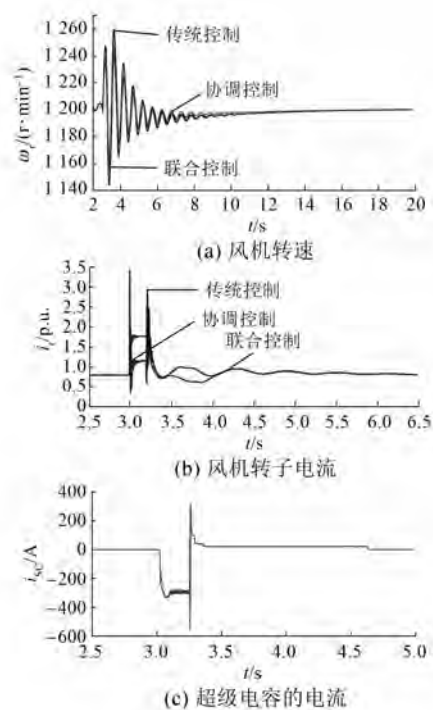


图 13 DFIG 仿真波形

【参考文献】

- [1] 国防科学技术工业委员会. 中频、双频发电机通用规范: GJB 1213—1991[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- [2] 蔺红, 晁勤. 并网型直驱式永磁同步风力发电系统暂态特性仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11): 1.
- [3] 贺益康, 周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 140.
- [4] 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.
- [5] YANG L, XU Z, OSTERGAARD J, et al. Advanced control strategy of DFIG wind turbines for power system fault ride through[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 713.
- [6] 杨启帆, 刘益青, 朱一鸣, 等. 适用于 DFIG 并网线路的改进负序方向元件[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 118.
- [7] MOHSENI M, ISLAM S, MASOUM M A S. Fault ride-through capability enhancement of doubly-fed induction wind generators[J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(5): 368. (下转第 75 页)

捕获最大风能,进行 MPPT 追踪。

(2) 仿真研究表明,ADRC 具有抗扰性能强的特性,能够实现风力发电系统最大功率输出的目标。且 ESO 能够实时地对系统的风速扰动进行实时估计并及时进行主动补偿,使得系统跟踪性能更好。因此,与传统 PID 控制方法相比,ADRC 具有更好的转速跟踪性能,更小的超调量,更快的响应速度。

【参考文献】

- [1] 田黄田. 风电机组变桨距系统自抗扰控制器的设计及参数优化[D]. 上海:上海电机学院,2019.
- [2] 李娟,张克兆,李生权,等. 最佳叶尖速比的最大功率自抗扰跟踪控制[J]. 电机与控制学报,2015,19(12): 94.
- [3] 汪秀才. 基于滑模变结构的中小型风力发电机组功率控制研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2017.
- [4] 王一森. 基于滑模变结构的双馈风力发电机功率解耦控制策略研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2018.
- [5] 刘英培,梁海平,栗然. 基于无源性与自抗扰控制的双馈风力发电系统研究[J]. 电工技术学报,2015,30(18): 121.
- [6] 何海艳. 双馈风力发电系统的变桨距自抗扰控制研究[D]. 沈阳:东北大学,2016.
- [7] 孙凌艳. 自抗扰控制在风电变桨系统中的应用研究[D]. 保定:河北大学,2015.
- [8] 张辰. 基于先进优化算法的 LADRC 风力发电过程控制研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.
- [9] 李建忠,瞿遂春,周飞,等. 开关磁阻电机自抗扰控制研究[J]. 湖南工业大学学报,2012,26(5): 37.
- [10] 刘波,孙德清. 基于自抗扰控制的双馈风力发电系统功率控制[J]. 微电机,2012,45(8): 62.
- [8] 杜宝星,刘观起,杨玉新. 电网电压跌落时双馈风电系统无功支持策略[J]. 电气技术,2012(12): 1.
- [9] 王伟,孙明冬,朱晓东. 双馈式风力发电机低电压穿越技术分析[J]. 电力系统自动化,2007,31(23): 84.
- [10] 吴俊玲,吴畏,周双喜. 超导储能改善并网风电场稳定性的研究[J]. 电工电能新技术,2004,23(3): 59.
- [11] 李鸿儒,金炜东,胡立锦,等. 基于无功判定法的 Crowbar 保护电路退出控制[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(15): 99.
- [12] 唐浩,郑涛,黄少锋,等. 考虑 Chopper 动作的双馈风电机组三相短路电流分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(3): 76.
- [13] 许建兵,江全元,石庆均. 基于储能型 DVR 的双馈风电机组电压穿越协调控制[J]. 电力系统自动化,2013,37(4): 14.
- [14] 郑丽,马维新,李立春. 超导储能装置提高电力系统暂态稳定性的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),2001,41(3): 73.
- [15] 汪春莉,徐玉琴,王磊,等. 运用 STATCOM 解决风电场 LVRT 问题的控制措施研究[J]. 可再生能源,2015,33(4): 551.
- [16] 边相阳,袁帅,孟令剑,等. SMES 提高 DFIG 低电压穿越能力策略研究[J]. 吉林电力,2019,47(6): 27.
- [17] 范高锋,迟永宁,赵海翔,等. 用 STATCOM 提高风电场暂态电压稳定性[J]. 电工技术学报,2007,22(11): 158.
- [18] 李鸿儒,金炜东,胡立锦. 双馈风电机组低电压穿越能力的提高[J]. 电力系统及其自动化学报,2013,25(5): 7.
- [19] 吴杰,孙伟,颜秉超. 应用 STATCOM 提高风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(24): 47.

(上接第 70 页)