

改进的 DFIG 与 VSC-HVDC 协调控制改善风电场 低电压穿越能力

边晓燕¹, 王本利¹, 陈建平², 杨立宁¹

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海虹桥商务区新能源投资发展有限公司, 上海 200090)

摘要: 经 VSC-HVDC 并网风电系统在风电场侧故障时, 风电机组出口母线电压过低, 极易引起风力机脱网。而双馈风力发电机(DFIG)传统的 Crowbar 技术在故障时将转子侧变流器(RSC)短接, 使发电机定子侧失去了为电网提供无功的能力, 风力机的低电压穿越能力较低。提出一种改进的 DFIG 模型, 加入了主动式 DC-Chopper, 与传统的 Crowbar 相配合, 降低 Crowbar 动作的概率, 使得 DFIG 转子侧变流器可以控制定子侧在故障时期继续提供无功功率。并利用此改进的 DFIG 与 VSC-HVDC 协调控制, 改善风电场侧母线电压水平。通过算例仿真表明, 在严重故障时采用改进式 DFIG 的 Crowbar 仍未动作。从而大大降低 Crowbar 动作的概率, 双馈风电机组 RSC 故障期间可以继续投入运行并为电网提供无功支持。完成故障期间 DFIG 两侧变流器与 VSC-HVDC 风电场侧变流器(WFVSC)之间的无功协调, 使风电场具有更好的低电压穿越能力(Low Voltage Ride Through, LVRT)。

关键词: 双馈异步发电机; 电压源高压直流; DC-Chopper; 协调控制策略; 低电压穿越

Improvement of low voltage ride through capability of wind farm using coordinated control of the improved DFIG and VSC-HVDC

BIAN Xiaoyan¹, WANG Benli¹, CHEN Jianping², YANG Lining¹

(1. Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Hongqiao New Energy Investment Corp, Shanghai 200090, China)

Abstract: When failures occurred in the wind farm side of the VSC-HVDC system, the grid voltage of wind farm was too low, leading to the typical tripping events of wind turbines. However, traditional DFIG uses Crowbar technology, the rotor side converter (RSC) is short circuited and the stator side of wide turbine loses its ability of providing reactive power for grid during the failures, the low voltage ride through ability of DFIG is low. This paper presents a new improved model of DFIG using active DC-Chopper to match the Crowbar. The RSC is controlled to make the stator side of wide turbine provide part of reactive power in a failure. Reactive power coordinated control strategy of the improved DFIG and VSC-HVDC is adopted, which improves voltage stability of system. The simulation results demonstrate that when the failure is serious, the improved type of DFIG Crowbar does still not act, so as to reduce the probability of the Crowbar action, and RSC can still provide reactive power support to grid. Reactive power coordinated control strategy of the two sides' converters and wind farm side of VSC-HVDC (WFVSC) makes the wind farm have a better ability of low voltage ride through.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177098).

Key words: doubly fed induction generator (DFIG); VSC-HVDC; DC-Chopper; coordinate control strategy; LVRT

中图分类号: TM721.1

文章编号: 1674-3415(2016)01-0009-08

0 引言

VSC-HVDC 输电技术是大规模远距离并网风

基金项目: 上海市科委科技创新项目(14DZ1200905); 上海绿色能源并网工程技术研究中心(13DZ2251900); 国家自然科学基金资助项目(51177098)

电场较理想的输电方式, 此类并网方式可以更好地提升风电的输送能力, 改善系统的稳定性, 其两侧变流器的无功调节能力可以降低风电场的电压波动, 提升风电场的低电压穿越能力^[1-4]。现运行的双馈风电机组对于提升风力机的低电压穿越能力采用的是 Crowbar 保护技术, 此技术可以在风力机出口母线电压过低时将双馈风电机组转子侧变流器短

接,使风力机不发出功率,降低风力机出口侧的电流,进而提升风电机组的低电压穿越能力。

针对电网发生严重故障情况下,基于 Crowbar 保护电路的双馈风电机组低电压穿越,文献[5]分析 Crowbar 阻值与最大短路电流及其出现时间之间的关系和 Crowbar 阻值及退出时间对 DFIG 的 LVRT 效果的影响。文献[6-7]提出了一种 Crowbar 控制策略,能有效抑制转子过电流、直流母线过电压以及电磁转矩的振荡,并可向电网注入无功电流以帮助电网电压的恢复。文献[8]提出一种基于无功功率判定的 Crowbar 退出控制方法,能实现 Crowbar 电路在故障切除后立刻退出,提高了 DFIG 的 LVRT 能力。文献[9-11]在传统 Crowbar 基础上,提出了一种新型的撬棒结构,提高风电场低电压穿越能力。

故障期间上述文献都没有考虑如何利用 DFIG 定子侧的无功能力,本文将现有的 Crowbar 保护改为采用主动式 DC-Chopper 配合传统 Crowbar 的保

护技术,可以大大降低 Crowbar 动作的概率,故障期间最大可能地利用 DFIG 的定子侧提供无功功率,并与 DFIG 网侧变流器(GSC)、WFVSC 的无功控制相协调,有效地利用风电场内部所有的无功源,从而提升风电机组出口侧母线电压,使风电机组具有更好的低电压穿越能力^[12]。

1 DFIG 风电场通过 VSC-HVDC 接入电网的数学模型

1.1 DFIG 风电场经 VSC-HVDC 并网结构

双馈风电场经 VSC-HVDC 并网的结构如图 1 所示。该系统由风电场、VSC-HVDC 并网系统及交流电网等部分组成。其中风电场由双馈风力发电机组组成,VSC-HVDC 并网系统由整流侧变换站、高压直流母线、逆变侧变换站、滤波器等组成^[13-14],交流电网由无穷大系统代替。

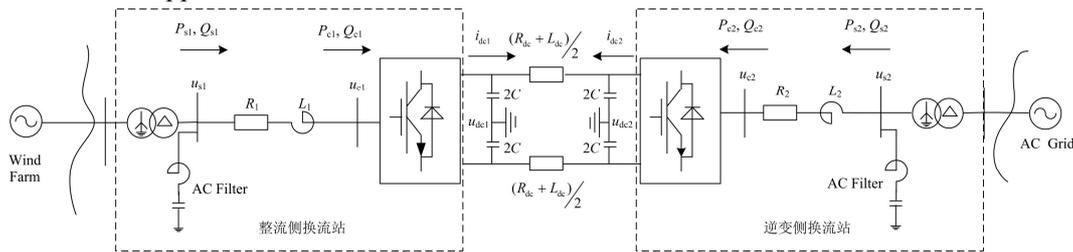


图 1 风电场经 VSC-HVDC 并网接入电网示意图

Fig. 1 Configuration of a grid-connected wind farm with VSC-HVDC

1.2 改进的 DFIG 模型

传统双馈风电机组中的 Crowbar 目的在于保护转子侧变流器,避免故障时被烧毁^[15],虽然保护了转子侧变流器,但是 Crowbar 动作时 DFIG 变成常规的异步发电机,需要从电网吸收大量无功,而且牺牲了风电机组在故障时的无功支持能力。因此,本文对此进行了改进,采用主动式 DC-Chopper 配合 Crowbar 代替传统的 Crowbar 保护技术,根据直流母线电压来控制 DC-Chopper 开关的投入。当电网电压跌落时网侧变流器(GSC)输出功率受到限制,能量在直流侧积累造成直流母线电压 u_{DC} 升高,当达到一定值时触发 DC-Chopper 电路中的 IGBT 导通,卸荷电阻投入运行,以分担过量的电流及功率,保护变流器安全及直流母线的电压稳定。恢复正常工况后 IGBT 截止,DC-Chopper 被切除。其结构示意图如图 2。

1.3 VSC-HVDC 换流站模型

VSC-HVDC 将两个交流系统隔离,两侧交流系统的频率可以不相同,并网条件更加简单,且具有故障隔离的作用。

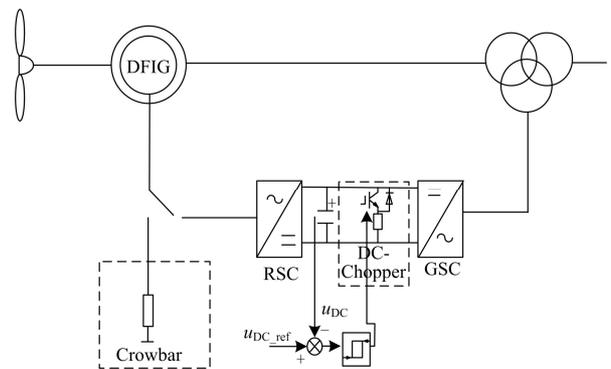


图 2 改进的 DFIG 结构示意图

Fig. 2 Structure frame of the improved DFIG

VSC-HVDC 的基本结构如图 1 所示, T_1 、 T_2 分别表示两侧换流站内的联结变压器, u_{s1} 、 u_{s2} 表示交流系统的母线电压, u_{c1} 、 u_{c2} 表示换流站输出电压基波分量。 R_1 、 R_2 及 L_1 、 L_2 表示线路的电阻和电感。VSC-HVDC 的交流电压和电流通过如图 3 所示的 Park 变化转换为同步坐标系下的方程为

$$\begin{cases} L_x \frac{di_{sdx}}{dt} = -R_x i_{sdx} - \omega L_x i_{sq} + u_{sdx} - u_{cdx} \\ L_x \frac{di_{sqx}}{dt} = -R_x i_{sqx} + \omega L_x i_{sd} + u_{sqx} - u_{cqx} \end{cases} \quad (1)$$

式中, 下标 x 表示换流站标号 ($x=1, 2$)。

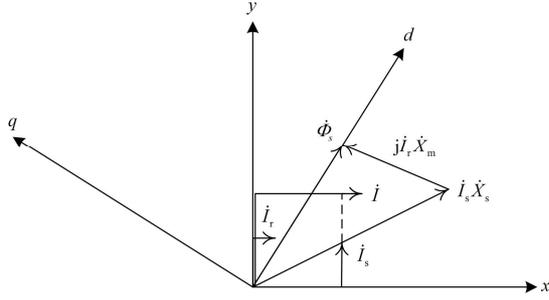


图 3 Park 变换 d - q 轴参考系

Fig. 3 d - q reference frame of Park vector transformation

换流器输出电压基波在 d 轴与 q 轴分量与直流电压 u_{dx} 的关系为

$$\begin{cases} u_{cdx} = K_x u_{dx} \cos \delta_x \\ u_{cqx} = K_x u_{qx} \sin \delta_x \end{cases} \quad (2)$$

式中: K_x 为直流电压利用系数; δ_x 为换流站输出电压与系统电压的相角。 K_x 和 δ_x 都是可控量。通过改变 K_x 和 δ_x 值, 调节换流站输出的电压幅值和相位值。本文采用交流系统电压基波定向矢量控制, 即 $u_{sqx} = 0$, 将式(1)代入式(2)得

$$\begin{cases} L_x \frac{di_{sdx}}{dt} = -R_x i_{sdx} - \omega L_x i_{sq} + u_{sdx} - K_x u_{dx} \cos \delta_x \\ L_x \frac{di_{sqx}}{dt} = -R_x i_{sqx} + \omega L_x i_{sd} + u_{sqx} - K_x u_{qx} \sin \delta_x \end{cases} \quad (3)$$

以上是 VSC-HVDC 的交流侧状态方程, 由上式可知两端的换流站在 d 轴和 q 轴不完全解耦, 同双馈风电机组的变流器相同。而对于 VSC-HVDC 的两端换流站直流侧而言又是关联和耦合的。VSC-HVDC 的直流侧方程为

$$\begin{cases} C \frac{du_{dc1}}{dt} = i_{dc1} - i_{dc} \\ C \frac{du_{dc2}}{dt} = i_{dc2} + i_{dc} \\ L_{dc} \frac{di_{dc}}{dt} = u_{dc1} - u_{dc2} - i_{dc} R_{dc} \end{cases} \quad (4)$$

式中: i_{dcx} 为换流站输出的基波电流值; i_{dc} 为直流线路的电流。式(4)经 dq 变换, 可得

$$\begin{cases} C \frac{du_{dc1}}{dt} = \frac{3K_1}{2} (i_{d1} \cos \delta_1 + i_{q1} \sin \delta_1) - i_{dc} \\ C \frac{du_{dc2}}{dt} = \frac{3K_2}{2} (i_{d2} \cos \delta_2 + i_{q2} \sin \delta_2) + i_{dc} \\ L_{dc} \frac{di_{dc}}{dt} = u_{dc1} - u_{dc2} - i_{dc} R_{dc} \end{cases} \quad (5)$$

联立式(4)和式(5), 可得 dq 坐标系下 7 阶 7 状态变量的常系数微分方程组成的 VSC-HVDC 数学模型。

采用交流系统电压基波定向矢量控制方式 dq 坐标下的功率方程为

$$\begin{cases} P_{sx} = \frac{3}{2} (u_{sdx} i_{dx} + u_{sqx} i_{qx}) \\ Q_{sx} = \frac{3}{2} (u_{sdx} i_{qx} - u_{sqx} i_{dx}) \end{cases} \quad (6)$$

2 基于改进的 DFIG 风电场 VSC-HVDC 接入系统下的协调控制策略

2.1 DFIG 风电场控制方案

主动式 DC-Chopper 的投入目的在于维持直流母线的电压稳定, 本文设定当 DC 线路电压超过 1.2 kV 时, 主动式 DC-Chopper 投入, 其中的电阻消耗并联电容中的容量, 当电压低于 1.15 kV 时, 退出运行。主动式 DC-Chopper 阻值与消耗功率的关系如图 4 所示。

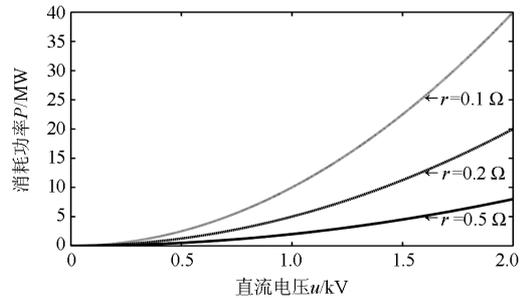


图 4 主动式 DC-Chopper 阻值与消耗功率的关系

Fig. 4 The correlativity between the resistance of active DC-Chopper and consumed power

2.2 DFIG 与 VSC-HVDC 的换流站协调控制方案

2.2.1 无功分配方案

本文所提出的协调控制策略最大的不同在于, 较大故障时 DFIG 的 RSC 不再退出, RSC、GSC 和 WFVSC 三者共同对系统进行无功支持, 其无功协调控制框图和无功控制流程图如图 5、图 6 所示。

DFIG 在正常情况下采用单位功率因数运行方式, 输出的无功几乎为零, 而当风力机出口侧发生短路尤其是三相短路故障时, 为了维持电压的稳定,

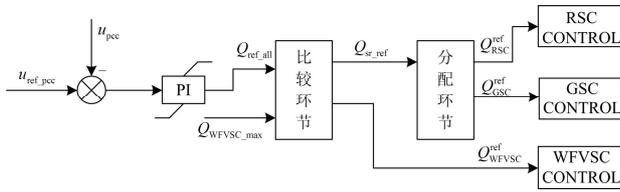


图 5 三者无功协调控制框图

Fig. 5 Control diagram of three coordinated control for reactive power

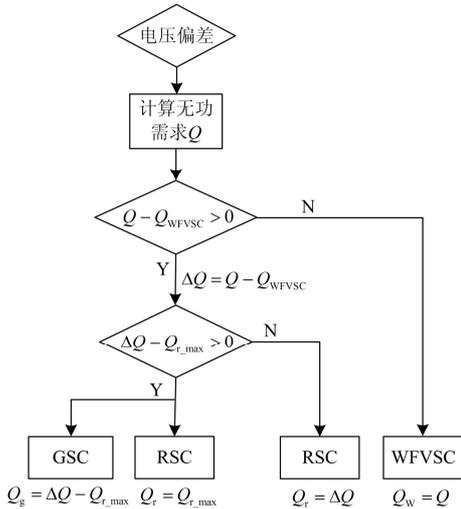


图 6 无功控制流程图

Fig. 6 Flow chart of reactive control

需要大量的无功支持, 此时需要改变风力机的控制策略, 使其在非单位功率因数下运行。当风电场侧

发生故障时, DFIG 和 VSC-HVDC 的风电场侧变流器均有对其进行无功支持的能力, 但是由于 DFIG 自身输出无功的能力有限, 当无功需求超过机组无功极限时, 需要减少有功出力, 以扩大机组无功极限, 不利于风力机的经济性, 相比较, VSC-HVDC 的变流器容量大, 能够动态地对系统进行无功支持, 可起到 STATCOM 的作用, 因此, 本文优先利用 VSC-HVDC 风电场侧变流器, 在其补偿无功后, 系统还有无功缺额时, 再充分利用 DFIG 机组自身的无功补偿能力。这样既保证了风力机的安全, 又最大可能地利用了风能, 兼顾了经济性。同时避免了各个变流器的频繁切换, 有利于电压的恢复。

2.2.2 DFIG 与 VSC-HVDC 变流器的控制策略

风电场转子侧变流器和网侧变流器均采用双环的 PI 控制方式, 根据控制目标的不同, 采用不同的外环控制。转子侧变流器采用有功功率和无功功率控制方式, 而网侧变流器采用直流电压控制方式, 内环采用电流控制^[16]。

VSC-HVDC 的换流站包括风电场侧换流站和电网侧换流站。风电场侧换流站的控制目标是将风电场发出的功率输送到电网中, 同时保证风电场并网电压的要求。本文借鉴传统的矢量控制结构, 构建了电压外环电流内环的双环控制结构^[17]。

根据图 6 无功协调控制流程图, 本文对 DFIG 的 RSC、GSC 和 VSC-HVDC 的 WFVSC 变流器的无功参考电压 Q_{ref} 协调分配, 具体控制框图如图 7 所示。

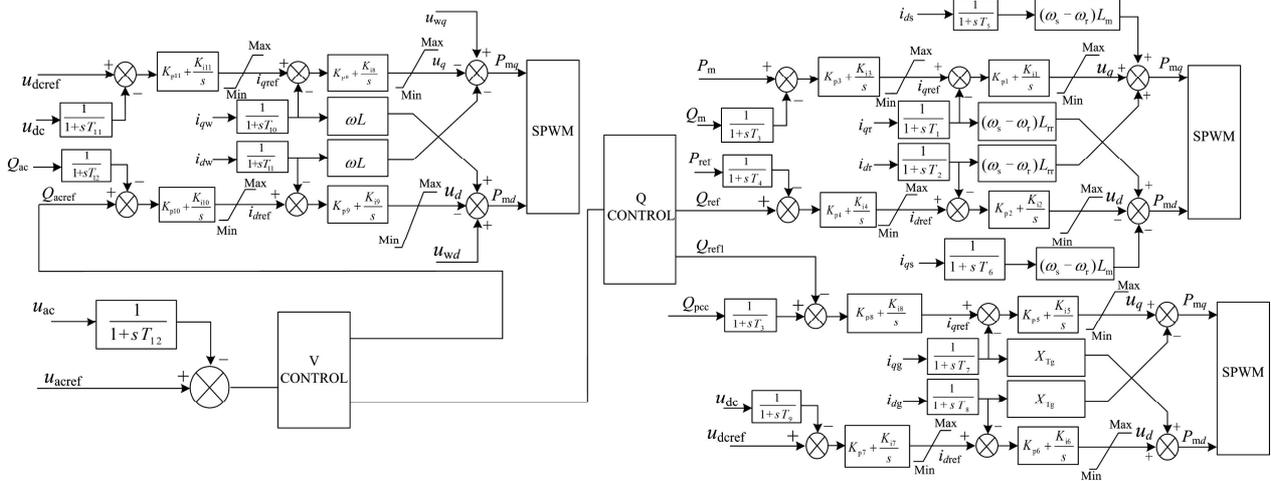


图 7 DFIG 与 VSC-HVDC 协调控制框图

Fig. 7 Coordination control block diagram of DFIG and VSC-HVDC

其中 V CONTROL 模块计算出故障时系统总的无功缺额, 然后根据图 5 分配给 WFVSC 与 Q CONTROL 模块, Q CONTROL 再依据优先级分配

给双馈风电机组的 RSC 和 GSC。

VSC-HVDC 电网侧换流站的控制以直流电压和无功功率为目标, 其控制图如图 8 所示。

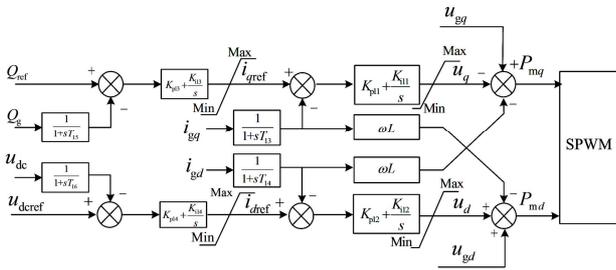


图 8 VSC-HVDC 的 GSC 控制图

Fig. 8 Control block of GSC of VSC-HVDC

3 风电场等值模型下的仿真验证

3.1 风电场等效仿真模型参数说明

本文搭建了如图 1 所示的仿真模型，其中风电场采用 22 台双馈风电机组并联等效组成，每台风力机额定容量为 5 MW，单机网侧变流器容量为 2 MW，经电抗器接入三绕组变压器，三绕组变压器高、中、低电压分别为 30 kV、3.3 kV、0.69 kV。主动式 DC-Chopper 电阻值为 0.5 Ω。单台 DFIG 风力机及网侧变流器的参数如表 1 所示。

表 1 单台 DFIG 风力机及其网侧变流器参数

Table 1 Parameters of single DFIG and the network side converter

DFIG 参数		网侧变流器参数	
参数	数值	参数	数值
额定功率/MW	5	额定功率/MW	2
额定电压/kV	3.3	额定交流电压/kV	0.704
定子电阻/p.u.	0.003	额定直流电压/kV	1.15
定子电抗/p.u.	0.125	交流电抗容量/MVA	2
转子电阻/p.u.	0.004	直流电容量/Mvar	0.667
转子电抗/p.u.	0.05		

3.2 算例仿真

3.2.1 PCC 点 b、c 两相对地故障仿真

图 9~图 12 给出了 PCC 点发生 b、c 两相短路接地时故障仿真对比。电压跌落至约 20%，故障持续 0.15 s 后清除。

如图 9 所示，故障清除后传统 DFIG 的 PCC 点电压恢复时间约在 2 s，且 PCC 点会出现一个 1.47 p.u. 的过电压，而改进 DFIG 的 PCC 点则无过电压现象，电压约在 1.6 s 恢复稳定，电压恢复时间更短。从图 10 可以看出，在发生故障时，传统 DFIG 直流母线电压峰值约为 1.26 kV，改进 DFIG 直流母线电压峰值约为 1.18 kV，之后电压波动也更平稳。图 11 中改进的 DFIG 转子电流峰值更小，波动也更小。图 12 中，传统的 DFIG 由于 Crowbar 动作，变为普通的异步发电机，故障后需要从电网吸收大量无功，

改进的 DFIG 能够在故障情况下发出一定无功，帮助电压的恢复。

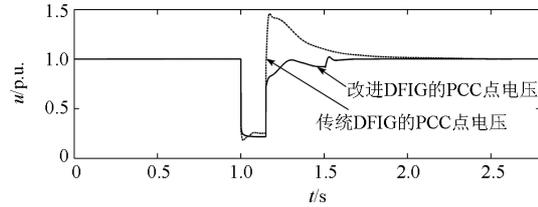


图 9 PCC 点电压波形对比图

Fig. 9 Comparison of PCC voltage

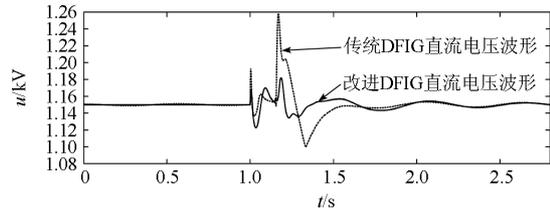


图 10 直流母线电压波形对比图

Fig. 10 Comparison of DC voltage between the improved control scheme and traditional scheme

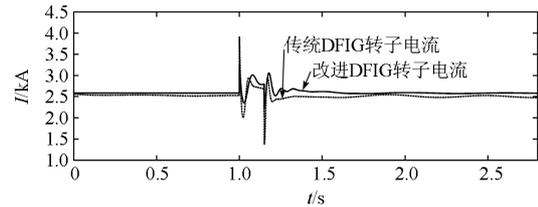


图 11 转子电流波形对比图

Fig. 11 Comparison of rotor current between the improved control scheme and traditional scheme

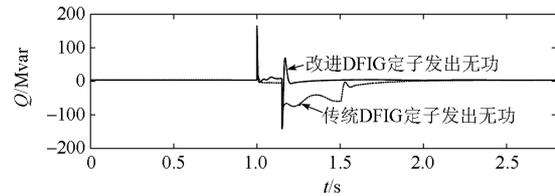


图 12 DFIG 定子提供无功波形对比

Fig. 12 Comparison of reactive power waveform provided by DFIG

3.2.2 PCC 点三相短路接地故障仿真

设置在 1 s 时风电场并网点 PCC 母线发生非金属性三相短路接地故障，电压跌落至约 20%。故障持续 0.15 s 后清除。仿真结果如图 13~图 17 所示。

由图 13 可看出，传统 DFIG 不采用协调控制时，PCC 点电压在故障切除后升高至接近 1.5 p.u.，然后缓慢下降至正常值，大约在 2 s 恢复稳态；采用改

进 DFIG 的协调策略, 故障期间 DFIG 的 RSC 依然能够为电网提供无功支持, 从故障恢复的曲线可以看出, PCC 点电压在故障切除后迅速恢复至 1 p.u. 附近, 在 1.4 s 即进入稳定状态, 故障恢复时间进一步缩短。

由图 14 可以看出, 在发生故障时, 传统 DFIG 直流母线电压峰值达到 2.4 kV, 改进 DFIG 直流母线电压峰值约为 1.5 kV, 相比之下减小了很多, 有

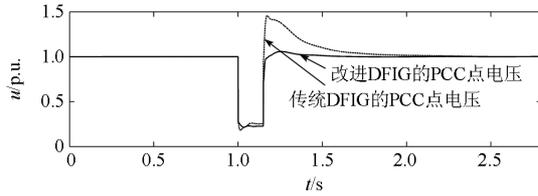


图 13 PCC 点电压波形对比图

Fig. 13 Comparison of PCC voltage between the improved control scheme and traditional scheme

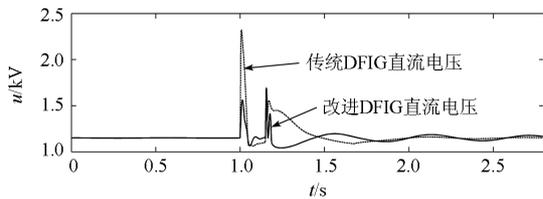


图 14 直流母线电压波形对比图

Fig. 14 Comparison of DC voltage between the improved control scheme and traditional scheme

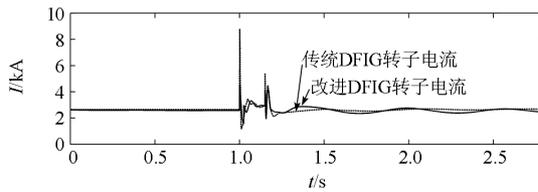


图 15 转子电流波形对比图

Fig. 15 Comparison of rotor current between the improved control scheme and traditional scheme

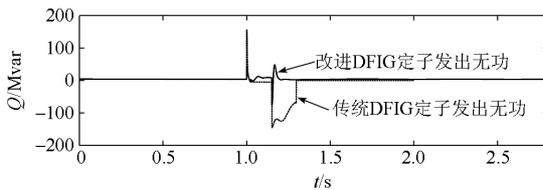


图 16 定子侧提供无功功率波形对比图

Fig. 16 Comparison of stator side reactive power between improved control scheme and traditional scheme

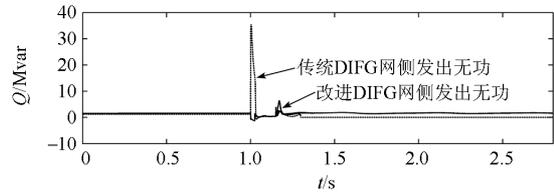


图 17 网侧变流器提供无功功率波形对比图

Fig. 17 Comparison of GSC reactive power between the improved control scheme and traditional scheme

效地保护了直流电容的安全, 1.15 s 时故障切除瞬间直流母线电压发生波动, 但仍在合理的范围内, 验证了改进式 DFIG 能够起到很好的控制直流母线电压的作用。

由图 15 可以看出, 1 s 发生故障时, 传统的 DFIG 转子侧电流迅速升高到 9 kA, Crowbar 投入, 采用改进式 DFIG 通过监测转子侧电流, 当故障时主动式 DC-Chopper 投入将转子电流控制在 4.5 kA, 在 5 kA 以下, 没有达到触发 Crowbar 动作的电流值, 且当电压跌落至 0.2 p.u. 时, Crowbar 仍未动作, 说明转子侧未出现过电压及过电流现象, 验证了主动式 DC-Chopper 的使用可以大大降低 Crowbar 动作的概率, 起保护风力机的作用, 为严重故障时实现转子侧变流器参与协调控制提供了前提条件。

图 16 显示了定子侧提供无功功率波形对比, 传统 DFIG 在 Crowbar 的作用下, 故障时定子侧是不具有无功发生能力的, 故障切除后发电机运行在常规异步发电机状态, 需要从电网吸收大量无功功率, 不利于电网电压的恢复, 严重时可能导致电网电压的崩溃。而改进的 DFIG 定子侧在严重故障时仍有为电网持续提供无功的能力, 且故障切除后不再从电网吸收无功功率, 有利于电压的恢复。

图 17 为网侧变流器提供无功功率波形对比图, 可以看出改进的 DFIG 无功波动更小, 低电压穿越更为平滑。

4 结论

本文通过改进双馈风电机组控制, 通过增加用主动式 DC-Chopper 配合 Crowbar, 使故障期间 Crowbar 动作概率大大降低, 最大程度利用转子侧变流器在故障时期为电网提供无功支持, 在此基础上提出双馈风电机组 RSC、GSC 及 WFVSC 三者协调控制策略, 并通过算例仿真得出如下结论:

(1) 在故障时期, 传统 DFIG 的 Crowbar 动作, 将转子侧变流器短接, 双馈风电机组变成常规的异

步发电机, 需要从电网吸收大量无功, 改进 DFIG 的 Crowbar 未投入, 降低了 Crowbar 动作的概率, 较好地稳定直流母线电压, 抑制转子过电流, 故障时最大程度地利用转子侧变流器为电网提供无功支持, 配合网侧变流器和 VSC-HVDC 风电场侧变流器的无功能力提升 LVRT 能力。

(2) 本文的无功协调控制策略是在综合分析三者的无功特性基础上提出, 优先利用 WFVSC, 不仅因为其响应速度快, 容量大, 而且为了保证风电场故障时期的有功输出能力兼顾了其经济性。

(3) 本文的控制策略对主动式 DC-Chopper 开关元件的灵敏性要求较高。如何控制开关投入及切除时间以及阻值选取的合理性, 还需要进一步完善。

参考文献

- [1] 李俊峰. 2012 中国风电发展报告[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [2] BAHMAN M P. HVDC transmission overview[C] // Transmission and Distribution Exposition Conference: 2008 IEEE PES Powering Toward the Future, PIMS 2008.
- [3] 牛博彦, 胡林献, 张众. 基于 VSC-HVDC 的风电场并网系统潮流算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 6-11.
NIU Boyan, HU Linxian, ZHANG Zhong. Research on power flow of wind farm grid-connected system based on VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 6-11.
- [4] 章心因, 胡敏强, 吴在军, 等. 基于 VSC-HVDC 并网风电场的低电压穿越技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 93-99.
ZHANG Xinyin, HU Minqiang, WU Zaijun, et al. Research on the low voltage ride-through technology of integrated wind farms based on VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 93-99.
- [5] 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.
- [6] 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.
JIANG Xuedong, ZHAO Fang. Crowbar control strategy for doubly fed induction generator of wind farm during power grid voltage dips[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 84-89.
- [7] 马文龙. Crowbar 保护在双馈异步风力发电系统电网故障穿越中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 127-130.
MA Wenlong. Application of Crowbar circuit in grid fault riding through for doubly-fed induction wind power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7): 127-130.
- [8] 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): 99-103.
LI Hongru, JIN Weidong, HU Lijin, et al. Crowbar protection circuit quitting control based on the reactive power judgment[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 99-103.
- [9] 郑重, 杨耕, 耿华. 电网故障下基于撬棒保护的双馈风电机组短路电流分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 7-15.
ZHENG Zhong, YANG Geng, GENG Hua. Short circuit current analysis for DFIG-based wind generation system with Crowbar protection under grid faults[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 7-15.
- [10] 张曼, 姜惠兰. 基于撬棒并联动态电阻的自适应双馈风力发电机低电压穿越[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 271-278.
ZHANG Man, JIANG Huilan. Adaptive low voltage ride-through of doubly-fed induction generators based on Crowbar with a parallel dynamic resistor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 271-278.
- [11] 李啸骢, 黄维, 黄承喜, 等. 基于 Crowbar 保护的双馈风力发电机低电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 67-71.
LI Xiaocong, HUANG Wei, HUANG Chengxi, et al. Analysis of doubly-fed wind power generator low voltage control strategy based on Crowbar protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 67-71.
- [12] 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.

LI Dongdong, YE Chensheng. Control strategy research of low voltage ride through based on the improved wind turbine generator system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 34-40.

[13] 黄晟, 王辉, 廖武, 等. 基于 VSC-HVDC 海上串联拓扑风电场低电压穿越控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 362-369.

HUANG Sheng, WANG Hui, LIAO Wu, et al. Control strategy based on VSC-HVDC series topology offshore wind farm for low voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 362-369.

[14] 郑超, 王贺楠, 刘洪涛, 等. 基于用户自定义程序的 VSC-HVDC 机电电磁混合仿真研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 168-174.

ZHENG Chao, WANG Henan, LIU Hongtao, et al. Study of the electromechanical and electromagnetic hybrid simulation for VSC-HVDC based on PSASP/UIPI[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 168-174.

[15] 苏平, 张靠社. 基于主动式 IGBT 型 Crowbar 的双馈风力发电系统 LVRT 仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 164-171.

SU Ping, ZHANG Kaoshe. Simulation research for LVRT of DFIG with active IGBT Crowbar[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 164-171.

[16] 向大为, 杨顺昌, 冉立. 电网对称故障时双馈感应发电机不脱网运行的系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 130-135.

XIANG Dawei, YANG Shunchang, RAN Li. Ride-through control strategy of a doubly fed induction generator for symmetrical grid fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 130-135.

[17] 王志新, 吴杰, 徐烈, 等. 大型海上风电场并网 VSC-HVDC 变流器关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 14-27.

WANG Zhixin, WU Jie, XU Lie, et al. Key technologies of large offshore wind farm VSC-HVDC converters for grid integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 14-27.

收稿日期: 2015-03-16; 修回日期: 2015-06-17

作者简介:

边晓燕(1976-), 女, 博士, 教授, 研究方向为海上风电, 电力系统分析、电力系统稳定与控制; E-mail: kuliz@163.com

王本利(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为风电并网暂态稳定性分析. E-mail: wangbenli_2008@126.com

(编辑 魏小丽)

[喜讯] 《电力系统保护与控制》影响力指数 CI 在电气工程学科排名第 5, 再次入选“中国国际影响力优秀学术期刊”

2015 年 12 月 18 日“中国学术期刊未来论坛”在北京开幕, 会上由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、中国学术文献国际评价研究中心、清华大学图书馆联合发布了《中国学术期刊影响因子年报》(2015 版)、《中国学术期刊国际引证年报》(2015 版)。

中国知网推出影响力指数 CI 来评价期刊的影响力, CI 是反映一组期刊中各刊影响力大小的综合指标, 它是将期刊在统计年的总被引频次和影响因子两个指标进行组内线性归一后向量平权计算所得的数值, 用于对组内期刊排序。根据影响力指数 CI 进行排名, 《电力系统保护与控制》在电气工程学科 105 种期刊中排名第 5。

《中国学术期刊国际引证年报》(2015 版)中, 共有 3 500 种科技期刊、1 220 种人文社科期刊参选, 对各刊计算期刊国际影响力指数 CI, 对科技备选期刊按 CI 由大到小排序后, 遴选出前 175 种科技期刊(TOP5%), 依次再遴选出 175 种科技期刊(TOP5%~TOP10%)名单, 将遴选方法、指标、初选名单送给专家进行评审, 根据专家意见删减了个别声誉不好的期刊, 按 CI 值依序补充, 保持入选期刊数量不变, 最终确定一份全面评价我国学术期刊国际影响力的名单——“2015 中国最具国际影响力学术期刊”和“2015 中国国际影响力优秀学术期刊”。《电力系统保护与控制》再次入选“中国国际影响力优秀学术期刊”。