

多端 VSC-HVDC 用于风电场联网时的控制策略

赵成勇¹, 胡冬良², 李广凯¹, 龙文¹

- (1. 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 河北省 保定市 071003;
2. 杭州市电力公司, 浙江省 杭州市 310000)

Control Strategy for Interconnection of Wind Farms by Multi-Terminal VSC-HVDC

ZHAO Cheng-yong¹, HU Dong-liang², LI Guang-kai¹, LONG Wen¹

- (1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control (North China Electric Power University), Ministry of Education, Baoding 071003, Hebei Province, China;
2. Hangzhou Electric Power Company, Hangzhou 310000, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Based on the control strategy for doubly fed induction generator (DFIG), an interconnecting mode for wind farms with power grid is proposed by use of multi-terminal voltage source converter high voltage direct current (MVSC-HVDC) power transmission, and a control strategy related to the proposed interconnection mode is developed. Comparing with traditional interconnection ways, the feasibility and reasonableness of the proposed interconnection mode are pointed out. Taking PSCAD/EMTDC as simulation environment, corresponding mathematical model is built to research the operation conditions among wind farms and their internal generation units under steady and transient states of power grid. Simulation results show that the equivalent models of DFIG can run normally and steadily, so the proposed interconnection mode and control strategy are correct and effective; wind farms as well as the units inside them can independently operate without interaction; when faults occur in AC power system at inversion side, the proposed control strategy possesses fast recovery characteristic that can effectively suppress the impacts caused by switching in/off of wind turbine generators.

KEY WORDS: doubly fed induction generator (DFIG); multi-terminal voltage source converter high voltage direct current (MVSC-HVDC); wind farm interconnection; control strategy

摘要: 基于双馈感应电机(double fed induction generator, DFIG)控制策略, 提出了多端电压源换流器高压直流输电(multi-terminal VSC-HVDC, MVSC-HVDC)用于风电场并网

的联网方式, 设计了相关的控制策略, 通过与传统交流联网方式相比, 指出了 MVSC-HVDC 的可行性和合理性。在 PSCAD/EMTDC 的仿真环境下, 建立了相关的数学模型, 研究了风电场之间及其内部机组在系统稳态和故障情形下的运行情况。仿真结果表明: DFIG 的等效模型能够正常稳定的工作, 所提出的并网方式和控制策略是正确和有效的; 风电场之间以及风电场内部各机组之间都独立运行, 互不影响; 当逆变侧交流系统发生故障时, 该控制策略有较快的恢复特性, 可有效抑制风机投切带来的冲击。

关键词: 双馈感应电机(DFIG); 多端电压源换流器高压直流输电(MVSC-HVDC); 风电场联网; 控制策略

0 引言

风力发电以其清洁、可再生、技术成熟、风力资源丰富等优势日益受到人们的重视。近年来, 随着电力发电技术的发展, 变速恒频风力发电机组已逐步成为兆瓦级风力发电机组的主流机型。而对于双馈感应发电机(double fed induction generator, DFIG), 在定子磁场定向矢量控制下, 通过对发电机定子侧有功和无功的解耦控制来实现最大风能捕捉的追踪控制。利用连接系统侧和发电机转子侧的变频器的无功功率调节能力控制风电机组无功功率, 是目前国内外专家比较认同的变速恒频双馈风电机组电气部分矢量控制的方案^[1-4]。

文献[5]从仿真的角度说明风机对于端电压暂时性的降落很敏感, 输配电系统电压波动而引起的风力发电机机端电压降落很容易导致切机, 从而减少风机的寿命。随着风能发电在整个发电量中的比重越来越大, 其应该对交流系统无功支撑、暂态恢复、系统稳定以及电压和频率调节等方面发挥更大的作用。为了解决这些问题, 人们往往从其它的方

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50577018); 高等学校学科创新引智计划(B08013); 长江学者和创新团队发展计划(IRT0515)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(50577018).

面入手,而忽视了对联网方式的研究。文献[6]指出了双馈式风力发电系统中长电缆传输带来的负面影响,但是没有指出其解决方案。文献[7]仅从经济性方面分析了交流输电和直流输电在风电场的联网方式,但是并没有从二者对电力系统稳定运行的影响等方面进行比较。文献[8]提出了采用电流源型高压直流输电(voltage source converter high voltage direct current, VSC-HVDC)来实现多台 DFIG 与电网的连接,但是 VSC 无法同时控制连接点处电压的幅值和频率,并且在实现大功率远距离输电的情况下需要补偿大量的无功功率。文献[9]在研究 DFIG 对最大风能追踪的过程中忽略了风力机的传动机构,仿真结果缺乏说服力。

随着电力电子技术的发展,采用 VSC-HVDC 联网具有以下优点^[10-13]:首先,VSC-HVDC 的换流站可以对有功和无功进行独立地控制,控制灵活方便;其次,VSC-HVDC 采用全控型器件,可以工作在无源逆变方式,使利用 VSC-HVDC 为远距离孤立负荷送电成为可能;再次,VSC 不仅不需要交流侧提供无功功率,而且能够起到 STATCOM 的作用,即动态补偿交流母线无功功率,稳定交流母线电压;最后,多个 VSC 可以连接到一个固定极性的直流母线上,易于构成与交流系统具有相同拓扑结构的多端直流系统,运行控制方式灵活多变。研究 DFIG 建模仿真和 VSC-HVDC 相关问题的文献很多,但研究 VSC-HVDC 用于风电场联网的文献较少。文献[14]建立了交流和 VSC-HVDC 两种联网方式下的仿真系统,指出 VSC-HVDC 联网方式在系统故障时可向系统提供无功支撑,有利于风电场在故障情况下实现不脱网运行。

对于双馈感应风力发电机组,本文提出利用 MVSC-HVDC 连接离散风电场的联网方案,在该拓扑结构中,用一个 VSC 连接多台 DFIG,而不是用一个电源来等效风电场^[15],因此更真实反映 DFIG 的电磁暂态特性及其对 VSC-HVDC 的影响,按照最大风能追踪的要求,实现风力发电机的解耦控制,使其不仅可以发出有功功率,而且可以发出无功功率,减少对当地无功补偿装置的要求。在 PSCAD/EMTDC 仿真环境下,本文将建立相关的模型,提出相应的控制策略,仿真结果验证了文中控制策略的合理性及控制器设计的有效性。

1 风电场的拓扑结构

潮流发生翻转时,VSC-HVDC 直流电压的极性

不变,这有利于构建多端直流输电系统。

VSC-HVDC 连接风电场的系统结构如图 1 所示,其中 W_1 、 W_2 、 W_3 分别代表 3 个风电场,每个风电场里面包含 5 台单机容量为 2 MW 且额定电压为 0.69 kV 的双馈感应电机,直流线路采用 100 km 电缆连接,额定直流电压为 ± 50 kV, S 为交流系统。 $T_i(i=1\sim 4)$ 为换流变压器,其中 $T_1\sim T_3$ 变比为 0.69 kV/62.5 kV, T_4 变比为 62.5 kV/35 kV, $C_1\sim C_4$ 为电容, $VSC_1\sim VSC_3$ 为整流站, VSI 为逆变站。

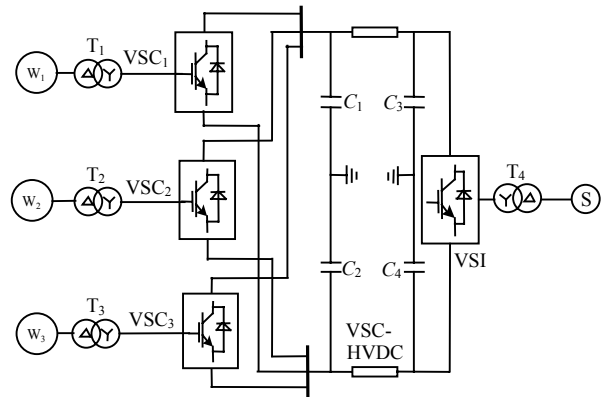


图 1 MVSC-HVDC 系统结构

Fig. 1 The system structure of MVSC-HVDC

风电场全部采用双馈感应电机,在结构上类似绕线式异步电机,其定子和转子均布有三相分布式绕组。定子绕组直接接入电网,转子和电网之间通过变频器连接,在变频器中能量可以双向的流动,其结构如图 2 所示。图中: P_{gen} 为发电机发出的功率; S_{pgen} 为经变频器流动的转差功率。

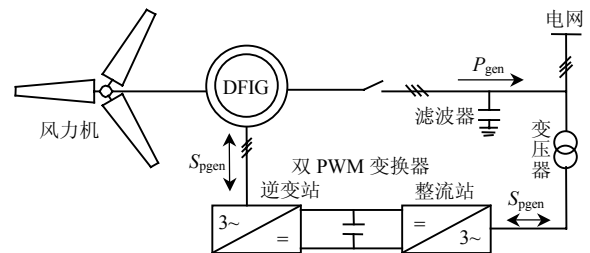


图 2 双馈感应电机结构

Fig. 2 The structure frame of the DFIG

设转子的转速为 n , 转子绕组通过变频器提供的励磁电流在转子绕组上产生的旋转磁场相对于转子的转速为 n_2 。当风速变化引起转速 n 变化时,应利用变频器调节转子的励磁电流频率 f_2 以改变转子磁场的旋转速度 n_2 , 使得在定子上感应出对应同步转速 n_1 的工频电压, 其关系表达式为

$$\begin{cases} n_1 = n \pm n_2 \\ f_2 = pn_2 / 60 = sf_1 = spn_1 / 60 \end{cases} \quad (1)$$

式中: s 为转差率; p 为极对数; f_1 为工频频率。转

子侧三相电流的相序取决于 n_1-n 的符号, 当 $n_1>n$ 时, $s>0$, 发电机处于亚同步运行状态, 定子向电网馈送能量, 电网向转子馈入能量; 当 $n_1<n$ 时, $s<0$, 发电机处于超同步运行状态, 此时定子和转子都向电网馈送能量。

2 控制系统的设计

2.1 最大风能跟踪

风电机组以风作为原动力, 风速直接决定了风电机组的动态特性。风电机组的输出功率主要受风速 v_w , 桨距角 β 和叶尖速比 λ 的影响。根据贝兹定理, 有

$$\begin{cases} P_w = 0.5C_p(\beta, \lambda)\rho\pi r^2 v_w^3 \\ T_w = P_w / \omega_w \\ \lambda = \omega R / v_w = 2\pi R n / (60v_w) \\ C_p(\beta, \lambda) = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta}\right] - 0.00184(\lambda - 3)\beta \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_w 为风力机产生的机械功率; ρ 为空气密度; ω 为风力机角速度; R 为风轮半径; T_w 为输出机械转矩; $C_p(\beta, \lambda)$ 为能量利用系数。

由式(2)可见, 在任何风速下, 只要使得风机的叶尖速比为最佳叶尖速比 λ_{opt} , 就可以维持风力机在最大风能利用系数 C_{pmax} 下运行^[1], 实现最大功率 P_{max} 的追踪。但实际上, 由于机械强度和其它物理性能的限制, 输出功率是有限的。因此, 当风速在额定风速以上时, 通过偏航控制和失速控制使其稳定运行在额定功率附近。

由 DFIG 的功率关系可知:

$$\begin{cases} P_{sref} = P_{max}(1-s) - \Delta P = k\omega_r^3 / (1-s) - \Delta P \\ \Delta P = P_{cul} + P_{fel} + P'_m / (1-s) \end{cases} \quad (3)$$

式中 P_{sref} 、 P_{cul} 、 P_{fel} 、 P'_m 分别为发电机定子输出功率、铜耗、铁耗和机械损耗; k 为比例常数。当发电机变速运行时, 通过检测转子角速度 ω_r , 按照式(3)可计算出 P_{sref} , 将其作为发电机的有功参考值, 可追踪和捕获最大风能。

2.2 DFIG 的控制

双馈电机的数学模型和等值电路详见文献[16-17], 并作如下假定^[18]: 1) 只考虑定转子电流的基波分量, 忽略谐波分量; 2) 只考虑转子空间磁动势基波分量; 3) 忽略磁滞损耗和铁耗; 4) 变频电源可为转子提供能满足幅值、频率及功率因素要求的电源, 不计其阻抗与损耗。

采用定子磁链定向矢量控制方法时, 采用外环功率控制、内环电流控制的双闭环控制策略控制转子侧换流器。DFIG 控制框图如图 3 所示。图中: T_w 和 ω_r 分别为风力机转矩和转速; θ 和 ω 分别为相角和转速; 下标 s 和 r 分别代表定子侧变量和转子侧变量; Ψ 为磁链; L_m 为激磁电抗; 下标 d 和 q 分别代表直轴和交轴变量。图中有功功率参考值 P_{sref} 和无功功率参考值 Q_{sref} 与反馈值 P_s 、 Q_s 进行比较, 其差值经过比例积分(proportional integral, PI)运算输出转子直轴和交轴电流的参考值 I_{dsref} 、 I_{qsref} , 之后通过与转子电流的测量值 I_{dr} 、 I_{qr} 比较, 经过 PI 调节后输出电压变量 U'_{dr} 和 U'_{qr} , 再通过前馈电压 U''_{dr} 和 U''_{qr} 补偿可获得转子电压指令 U_{drref} 和 U_{qrref} , 经过 park 变换得到发电机转子绕组的励磁电压 U_{ra} 、

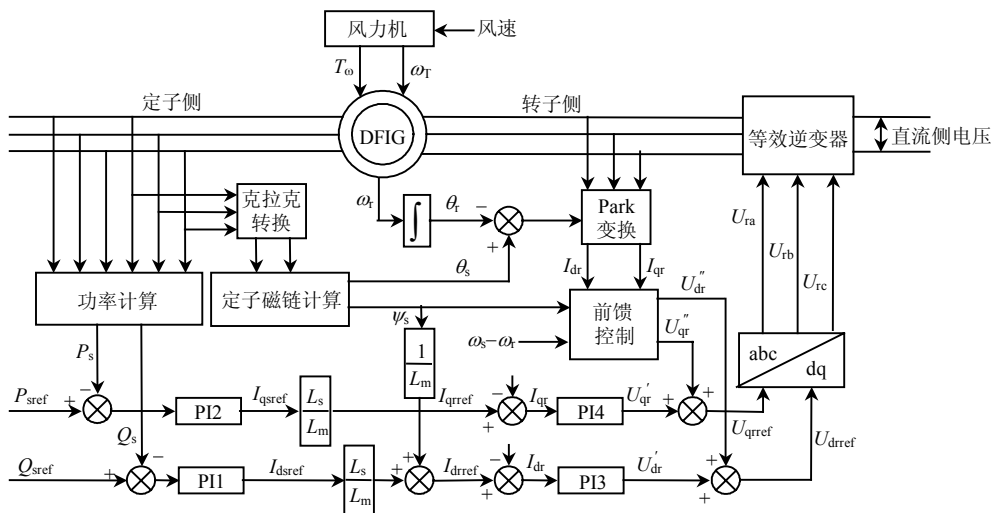


图 3 DFIG 控制框图
Fig. 3 The control block graph of DFIG

U_{tb} 、 U_{tc} ，实现 DFIG 有功和无功的解耦控制。

2.3 MVSC-HVDC 的控制

对整流侧都采用相同的控制策略，本文以图 4 的 VSC-HVDC 简化模型为例分析其工作原理，并提出相应的控制策略。图中：W 代表风电场；G 代表电网，换流器用一个简单 IGBT 模型表示； C_1 、 C_2 为直流电容，RMS 表示取有效值运算； U_{s1} 为交流系统侧母线电压基波向量； U_{c1} 为换流器输出电压基波向量； δ_1 为 U_{c1} 滞后 U_{s1} 的角度； L_1 为换流电抗器的等效电感； R 为 VSC 的等效损耗电阻； P_{s1} 和 Q_{s1} 分别为交流系统输出的有功和无功功率； P_{c1} 和 Q_{c1} 分别为 VSC 吸收的有功和无功功率； U_{dc} 和 U_{dcref} 分别为直流侧电压及其参考值；下标 1 和 2 分别表示整流侧和逆变侧；下标 ref 表示参考值。

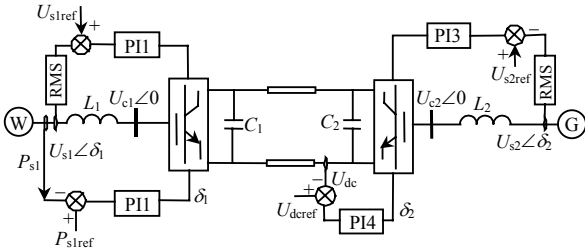


图 4 VSC-HVDC 的控制结构

Fig. 4 The control block graph of VSC-HVDC

整流侧输出的有功功率和无功功率分别为

$$P_{s1} = \sin \delta_1 U_{s1} U_{c1} / X_1 \quad (4)$$

$$Q_{s1} = U_{s1} (U_{s1} - U_{c1} \cos \delta_1) / X_1 \quad (5)$$

由式(4)可见，有功功率的传输主要取决于相角 δ_1 ，当 $\delta_1 > 0$ 时 VSC 吸收有功功率，相当于传统 HVDC 中的整流器运行；当 $\delta_1 < 0$ 时 VSC 发出有功功率，相当于传统 HVDC 中的逆变器运行，因此通过控制 δ_1 就可以控制直流电流的方向及输送功率的大小，稳定系统频率。

由式(5)可见，无功功率的传输主要取决于 $U_{s1} - U_{c1} \cos \delta_1$ ，当 $U_{s1} - U_{c1} \cos \delta_1 > 0$ 时，VSC 吸收无功功率；当 $U_{s1} - U_{c1} \cos \delta_1 < 0$ 时，VSC 发出无功功率。所以，通过控制 U_{c1} 的大小就可以控制 VSC 发出或吸收的无功功率及其大小。可见，VSC 不仅能提高功率因数，而且还能起到 STATCOM 的作用，动态补偿交流母线的无功功率，稳定交流母线电压。

当忽略谐波分量时，逆变站输出电压基波分量 $u_{c2}(t)$ 与其直流电压 U_{dc2} 之间的关系为^[19]

$$u_{c2}(t) = (M_2 / 2) U_{dc2} \sin(\omega t + \delta_2) \quad (6)$$

改变 δ_2 就可以改变 U_{c2} 和 U_{s2} 的相位关系，从而改变有功功率的大小和方向，这样可以利用 δ_2 控制

U_{dc2} 。 U_{s2} 与逆变侧调制度 M_2 近似呈线性关系，可以利用简单的 PI 控制实现 M_2 对 U_{s2} 的控制。

综上所述，由于风电场所发出的功率必须全部送出，否则会导致风电场侧系统频率升高，因此希望发电机机端电压尽可能维持稳定，所以采用图 4 所示的定功率和定交流电压控制策略控制发电机侧的 VSC₁~VSC₃。在 VSC-HVDC 中，必须有一端定直流电压控制，另外，当电网发生短路故障时，系统无功不足，而 VSI 对无功有着快速调节能力，因此采用定直流电压和定交流电压控制 VSI 对维持系统稳定起很大的作用。

3 仿真算例

在 PSCAD/EMTDC 仿真环境下，系统参数如下：风轮半径 $R=36.4\text{m}$ ，最佳叶尖速比 $\lambda_{opt}=10.35$ ，空气密度 $\rho=1.25 \text{ kg/m}^3$ ；额定风速为 13 m/s 。DFIG 的额定功率为 2 MVA ，定子绕组电阻 $R_s=0$ ，转子电阻 $R_r=0.019 \text{ pu}$ ，定子漏抗 $L_{\sigma s}=0.275 \text{ pu}$ ，转子漏抗 $L_{\sigma r}=0.295 \text{ pu}$ ，激磁电抗 $L_m=6.92 \text{ pu}$ 。MVSC-HVDC 的直流电压参考值为 $\pm 50 \text{ kV}$ ，电容为 $1000 \mu\text{F}$ 。整流站有功参考值为与其相连 DFIG 的有功参考值之和，图中变量下标 1、2、3、ref 分别代表 3 个风电场的相关变量和参考值。

算例 1：3 个风电场运行在不同的风速下实现 MVSC-HVDC 并网。风电场的风速分别如图 5(a) 中 v_{w1} 、 v_{w2} 、 v_{w3} 所示，从图 5(b)(c) 可以看出风电场母线电压基本维持稳定，风电场 1 在 7 s 后风速已经超过额定风速，DFIG 超同步运行，通过偏航控制和失速控制使其稳定运行在额定功率附近；图 5(d) 为风电场 3 单机有功功率参考值 P_{sref3} 和实际输出有功 P_{s3} 和无功 Q_{s3} ，可以看出，风机能够很好地实现最大功率的跟踪，并且可以实现有功和无功的解耦控制，当系统无功不足时，由 DFIG 发出无功，可以减少系统中的无功补偿装置。图 5(e) 为直流电压，逆变侧直流电压保持稳定在 $\pm 50 \text{ kV}$ ，整流侧的直流电压随着风速的变化做出轻微的波动。

算例 2：第 3 个风电场内部风速发生变化时，由 VSC₃ 将其联网。风电场内部风机运行在不同工作状态时的仿真结果如图 6 所示。图 6(a) 中：一部分风机的风速为 v_{w31} ，另一部分风机的风速为 v_{w32} 。图 6(b) 为运行在对应风速下风机输出的功率和参考功率，从中可以看出，各个风机仍然能实现最大功率的追踪和有功无功的解耦控制。

算例 3：逆变器交流侧在 7 s 时发生 a 相短路接

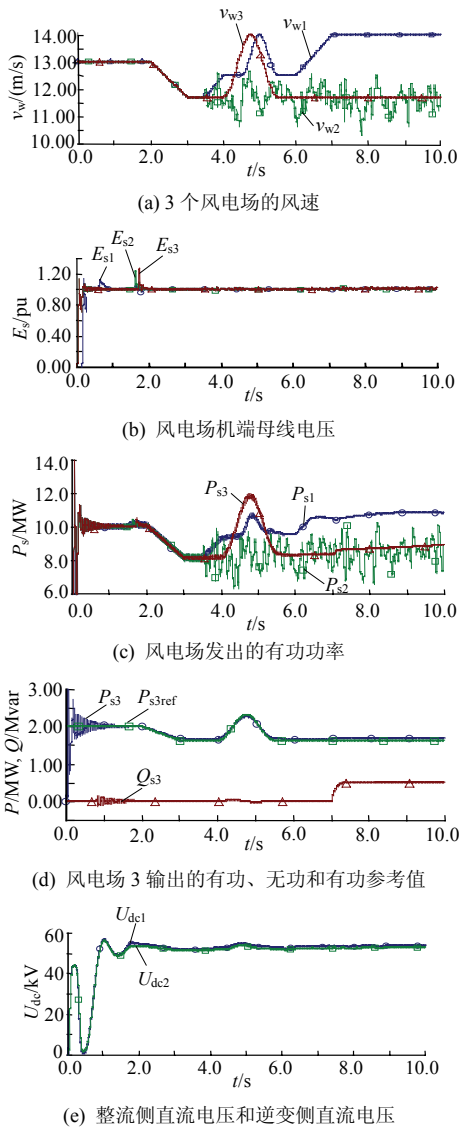


图 5 MVSC-HVDC 系统稳态运行时的仿真结果

Fig. 5 Simulation results under system steady-state operation of MVSC-HVDC

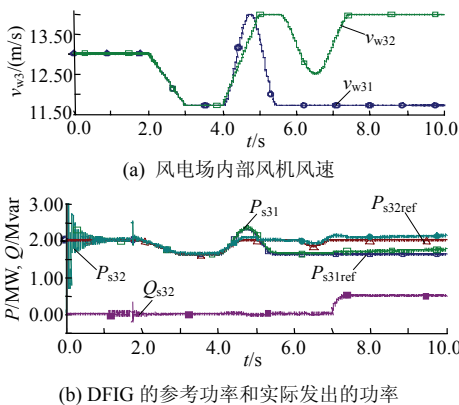


图 6 风电场内部风机运行在不同工作状态时的仿真结果

Fig. 6 Simulation results when wind farm internal generators operate at different working status

地故障, 故障持续时间为 0.05s, 风速为图 5(a)中的 v_{w3} , 发生单相接地故障后, 逆变侧无功不足, 采用

逆变器定交流电压控制 VSC-HVDC, VSI 快速发出无功为系统提供无功支撑, 维持交流电压的稳定。交流系统故障情况下的运行结果见图 7。图中下标 AC 和 VSC-HVDC 分别表示交流联网方式和 VSC-HVDC 联网方式下的结果。从图 7(a)(b)可以看出, 交流联网方式下, 故障时逆变侧母线电压下降到额定值的 0.63, 整流侧的电压随着风速变化几乎达到额定值的 1.1 倍, 在容许范围之内; 而采用上述控制策略的 VSC-HVDC 联网时, 逆变侧母线电压暂降到额定值的 0.85, DFIG 机端电压维持在额定值附近, 波动幅度很小, 为 DFIG 的稳定运行提供了良好的条件; 由图 7(c)(d)可知, 直流电压和风电场的输出功率受到较小的影响并很快恢复稳定。

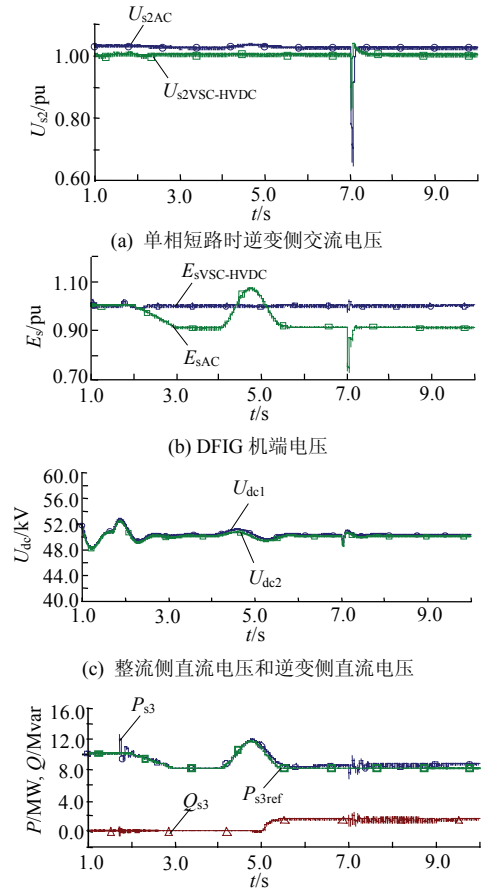


图 7 交流系统故障情况下的运行结果

Fig. 7 Operation results in case of AC system failures

4 结论

1) 本文在 PSCAD/EMTDC 仿真环境下建立了 DFIG 模型, 将 DFIG 中转子侧逆变器等效为一受控电压源, 采用外环功率控制内环电流控制的双闭环控制策略实现了 DFIG 有功和无功的解耦控制, 使 DFIG 可以发出无功, 从而减少当地的无功补偿

装置。

2) 利用 MVSC-HVDC 将风电场联网, 用一个换流站连接多台 DFIG, 体现了良好的经济性。仿真结果表明, 本文的控制策略简单实用, 且在故障情况下比交流联网更具优越性。

3) 离散风电场之间可以在不同条件下采用 MVSC-HVDC 并网, 甚至在同一风电场内 DFIG 运行在不同的风速下也可以稳定运行, 当逆变侧交流系统发生单相短路故障时, 对整个系统稳定运行影响很小, 这充分体现了 VSC 良好的电压和无功调节特性。

参考文献

- [1] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 83-87.
- [2] 尹明, 李庚银, 周明, 等. Analysis and comparison of dynamic models for the doubly fed induction generator wind turbine[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 22-27.
- [3] Pena R, Clare J C, Asher G M. Double fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind energy generation[J]. IEEE Proceedings of Electric Power Application, 1996, 143(5): 231-241.
- [4] Tang Yifan, Xu Longya. A flexible active and reactive power control strategy for a variable speed constant frequency generating systems [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1995, 10(7): 472-478.
- [5] 靳静, 艾芊, 赵岩. FACTS 装置在风电场中的无功补偿原理与仿真[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8): 58-61.
Jin Jing, Ai Qian, Zhao Yan. Reactive compensation principle and simulation of FACTS device in wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(8): 58-61(in Chinese).
- [6] Pena R, Clare J C, Asher G M. A double fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine[J]. IEEE Proceedings of Electric Power Application, 1996, 143(5): 380-387.
- [7] Paola B, Wil L. HVDC connection of offshore wind farms to the transmission system[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 37-43.
- [8] Xiang Dawei, Li Ran. Coordinated control of an HVDC link and double fed induction generators in a large offshore wind farm [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1): 463-471.
- [9] 杨思祥, 李国杰, 阮思焯, 等. 应用于 DFIG 风电场的 VSC-HVDC 控制策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 64-67.
Yang Sixiang, Li Guojie, Ruan Siye, et al. Control strategies for VSC-HVDC applied to DFIG based wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 64-67(in Chinese).
- [10] 文俊, 张一工, 韩民晓, 等. 轻型直流输电——一种新一代的 HVDC 技术[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 47-51.
Wen Jun, Zhang Yigong, Han Minxiao, et al. HVDC based on voltage source converter—a new generation of HVDC technique[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 47-51(in Chinese).
- [11] 李国杰, 阮思焯. 应用于并网风电场的有源型电压源直流输电系统控制策略[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 52-55.
Ruan Siye, Li Guojie. Control strategy of VSC-HVDC with energy storage system used in grid-connected wind farms[J]. Power System Technology, 2009, 33(1): 52-55(in Chinese).
- [12] 吴俊宏, 艾芊. 多端柔性直流输电系统在风电场中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 22-27.
Wu Junhong, Ai Qian. Research on multiterminal VSC-HVDC system for wind-farms[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 22-27(in Chinese).
- [13] 徐科, 吴超, 杨晓静, 等. VSC-HVDC 系统风力发电结构分析与控制[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 103-108.
Xu Ke, Wu Chao, Yang Xiaojing, et al. Structure analysis and control of wind power generation in VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 103-108(in Chinese).
- [14] 赵清声, 王志新. 双馈风力发电机组系统接入与稳定仿真[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 69-74.
Zhao Qingsheng, Wang Zhixin. Simulation study on grid integration and steady operation of doubly-fed wind turbine generators[J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 69-74(in Chinese).
- [15] Yin Ming, Li Gengying. Analysis and control of wind farm incorporated in unbalanced condition[C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, Asia and Pacific, 2005.
- [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. System simulation of a doubly fed induction generator ride-through control for symmetrical grid fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 130-135(in Chinese).
- [17] 卞松江, 吕晓美. 交流励磁变速恒频风力发电系统控制策略的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 57-62.
Bian Songjiang, Lü Xiaomei. Modeling and simulation of AC excited VSCF in wind power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 57-62(in Chinese).
- [18] 孙秋霞. 双馈感应风力发电系统的基础理论与仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [19] 尹明, 李庚银, 牛同义. VSC-HVDC 连续时间状态空间模型及其控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 34-39.
Yin Ming, Li Gengyin, Niu Tongyi. Continuous-time state-space model of VSC-HVDC and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 34-39(in Chinese).



赵成勇

收稿日期: 2009-02-03。

作者简介:

赵成勇(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高压直流输电与 FACTS 技术、电能质量分析与控制、电力系统 RTDS 建模等;

胡冬良(1982—), 男, 硕士, 主要研究方向为高压直流输电及柔性交流输电, E-mail: hdlncpeu@163.com;

李广凯(1975—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为新型输配电技术。

(责任编辑 杜宁)