

DFIG 型海上风电混合直流送出的控制策略

翟冬玲¹, 韩民晓¹, 严稳利¹, 孙 栩²

(1. 华北电力大学 电气与工程学院, 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 为了减少海上风电经采用电压源换流器的直流输电系统送出的系统的造价, 提出的基于双馈风机的海上风电经混合直流输电送出的拓扑结构是: 风电场侧换流器为电压源换流器, 逆变侧换流器为电网换相换流器(LCC)。为保证系统在正常状态下稳定运行并能够对风速变化进行功率追踪, 风电场侧换流站采取定交流电压和给定频率的控制, 逆变侧采取定直流电压控制。同时, 针对电网为弱系统时易发生连续换相失败故障, 提出在 LCC 的控制系统中加入定关断角控制作为故障备用控制, 并在定关断角控制启动时在风电场侧整流站加入定直流电压控制来抑制换相失败。在 PSCAD 仿真软件中模拟海上风电利用混合直流送出电能, 仿真结果验证了混合直流输电系统能够跟踪风电场输出的功率变化, 在交流侧故障时协调控制策略的转换能够减少换相失败的次数, 保证系统恢复正常运行。

关键词: 风电; 高压直流输电; 双馈风机; 电压源换流器; 电网换相换流器; 换相失败

中图分类号: TM 614; TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.02.007

0 引言

已经广泛应用的传统电网换相高压直流输电(LCC-HVDC), 具有大容量远距离输电、有功功率快速可控等特点, 然而传统直流输电在运行时会消耗相当大的无功功率且需要大量的滤波装置, 易发生换相失败^[1-2]。随着电力电子器件的发展, 产生了电压源换流器(VSC), 基于电压源换流器的直流输电(VSC-HVDC)具有有功/无功功率独立控制、谐波小、可以工作在无源逆变方式、可以向弱交流系统供电等优势, 但器件损耗大, 造价较高^[3]。因此已经有很多学者开始研究混合直流输电方式, 混合直流提出的意义在于将传统直流输电与轻型直流输电的优点综合起来, 降低造价^[4]。尽管目前 VSC-HVDC 在输送容量和输送电压上, 与 LCC-HVDC 相比有一定距离, 但考虑到 VSC-HVDC 的发展趋势, 混合直流输电具有重要的研究价值和工程前景。

混合直流输电适用于向无源网络供电和新能源并网领域。随着新能源技术的发展, 风力发电越来越受到大家的关注。目前, 变速恒频机组已成为主流机型, 主要包括 2 种: 双馈感应发电机(DFIG)和永磁同步发电机。在我国已经并网发电的风力发电机组中, 双馈风机发电机组所占比例较大, 也具有较为成熟的控制方案。

文献[5]对基于 DFIG 的风电场经整流侧为电网换相换流器(LCC)、逆变侧采用全控器件的电流源型逆变器的混合直流输电送出进行了建模分析, LCC 为风电场侧整流站, 需要安装 STATCOM, 缺乏经济性, 也增加了海上换流站的占地面积。文献[6-7]的混合直流输电系统的整流侧为 VSC, 逆变侧为 LCC,

文献[6]中提出在受端交流系统发生故障时, 逆变器要转换成电容换相式换流器, 文献[7]对逆变侧为 LCC 的混合直流输电系统进行了研究, 逆变侧的控制方式为带低压限流环节的定直流电流控制方式, 能够帮助系统在故障后快速恢复, 但文献[6-7]没有对逆变侧交流系统故障后发生连续换相失败导致系统无法恢复运行这一问题进行分析。本文将针对由双馈风机构成的海上风电场经整流侧 VSC、逆变侧 LCC 的混合直流送出的情况进行研究。

本文首先叙述了基于双馈风机的风电场联接混合直流输电系统的拓扑和数学模型, 并针对系统结构设计了控制策略: 在正常运行时, 采取风电场侧换流站(WFVSC)定交流电压控制, 频率为给定值, 逆变侧定直流电压控制, 此换流站的基本控制策略可以使换流站传输的有功功率追踪风电场的功率变化; 针对交流电网为弱系统时, 在 LCC 加入定关断角控制, 并在定关断角控制作用时, 在 VSC 的控制中加入定直流电压控制, 可有效减少换相失败发生。最后在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中建立仿真模型, 分别在稳态和故障情况下进行仿真、验证。

1 系统拓扑结构分析

基于 DFIG 的风电场的混合直流输电送出拓扑结构如图 1 所示。各个 DFIG 所发出的电能经过变压器汇聚到交流母线上, 由 VSC 进行整流, 经过高压直流输电电缆, 再通过 LCC 逆变, 连接到电网上。整流站为一组两电平 VSC, 包括变压器、滤波器、换流电抗器和直流电容。逆变侧采用由晶闸管组成的六脉动 LCC, 包括变压器、滤波器、平波电抗器。

与文献[5]所述系统结构相比, 双馈风机与整流侧为 VSC、逆变侧为 LCC 的混合直流输电联接, 可以

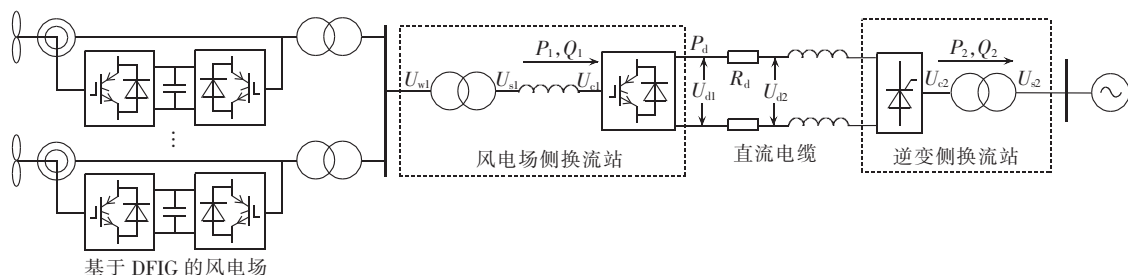


图 1 基于 DFIG 的风电场的混合直流输电送出拓扑结构

Fig.1 Topology of offshore DFIG-based wind farm with hybrid HVDC transmission

利用 VSC 的独立控制有功和无功功率的特性,灵活控制整流侧交流电压,无需无功补偿装置和外部电源,滤波装置少,减小了设备投资,减少了海上整流站的占地面积。

2 系统模型

根据贝兹证明,风力机从风能中吸收的有功功率公式为:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p v^3 \quad (1)$$

其中, P 为风轮输出功率; ρ 为空气密度; R 为风轮半径; C_p 为风轮利用系数; v 为风速。在机械参数和转速一定的情况下,不考虑损耗,从风电场发出的功率只与风速有关。

如图 1 所示,受端交流电压为 U_{s2} ,逆变器阀交流侧的输出电压基波幅值为 U_{c2} ,等值换相电抗为 X_{L2} 。设 LCC 的超前角为 β ,触发角为 α ($\beta = 180^\circ - \alpha$),熄弧角为 γ ,换相角为 μ ,逆变侧的数学模型如下:

$$U_{d2} = 1.35 U_{c2} \cos \beta + \frac{3}{\pi} X_{L2} I_d \quad (2)$$

$$\mu = \arccos \left(\cos \gamma - \frac{2 X_{L2} I_d}{\sqrt{2} U_{c2}} \right) - \gamma \quad (3)$$

当直流电流升高或交流侧电压降低时,均引起 μ 加大。在 β 不变时, μ 的加大意味着 γ 的减小 ($\beta = \mu + \gamma$),会发生换相失败^[2,8]。

风电场交流母线电压为 U_{w1} ,整流器阀交流侧输出电压基波幅值 U_{c1} ,整流侧的直流电压为 U_{d1} 。若 VSC 采用 SPWM,假设调制比为 M ,直流线路的电阻为 R_d ,阀交流侧的基波电压与直流电压的关系如下:

$$U_{c1} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}M} U_{d1} \quad (4)$$

直流线路上的直流电流 I_d 的计算公式为:

$$I_d = (U_{d1} - U_{d2}) / R_d \quad (5)$$

不考虑功率从风力机传输到风电场侧换流器阀直流侧的有功损耗,风电场侧换流器传输的有功功率 P_d 就等于风电场发出的功率 P , P_d 的计算公式为:

$$P_d = U_{d1} I_d \quad (6)$$

将式(5)换算成式(7)代入式(6)中展开,可得:

$$U_{d1} = I_d R_d + U_{d2} \quad (7)$$

$$P_d = R_d I_d^2 + U_{d2} I_d \quad (8)$$

对二次方程求解并取正解,可求得 I_d 与 P_d 和 U_{d2} 的关系式:

$$I_d = \frac{-U_{d2} + \sqrt{U_{d2}^2 + 4P_d R_d}}{2R_d} \quad (9)$$

将式(9)代入式(6),可求得 U_{d1} 与 P_d 和 U_{d2} 的关系式:

$$U_{d1} = \frac{2R_d P_d}{-U_{d2} + \sqrt{U_{d2}^2 + 4P_d R_d}} \quad (10)$$

将式(10)代入式(4),可得:

$$U_{c1} = \frac{\sqrt{3} R_d P_d}{\sqrt{2} M (\sqrt{U_{d2}^2 + 4P_d R_d} - U_{d2})} \quad (11)$$

由式(11)知,逆变侧采用定直流电压控制方式时, U_{d2} 为定值,如果 M 为定值,则功率的变化必然会引起 U_{c1} 的变化,继而引起风电场交流母线电压的变化,所以风电场侧换流器必须采用定交流电压的闭环控制。

3 基本控制策略设计

基本控制策略的重点在于直流输电系统能够追踪风电场发出功率的变化,可以稳定运行。

3.1 双馈风机背靠背换流器的控制

每个双馈风机转子上联接了背靠背的小容量换流器。转子侧换流器采用定子磁链定向矢量控制,外环控制为定转速和定无功功率控制,通过定转速控制,可以跟踪最大功率,内环为电流控制。网侧换流器采用了电网电压定向矢量控制,外环控制采取了定直流电压和定无功功率控制,内环为电流控制^[9]。

3.2 直流输电系统整流器的基本控制

风电场侧换流站要控制风电场母线的交流电压和频率保持稳定,如果采用基本的定直流电压或定有功功率等控制方式,无法跟踪风电场有功功率的变化。本文将风电场侧换流站看成一个具有固定的频率、交流电压和相角的无穷大电压源,从风电场发出的电能,可以通过无穷大电源吸收后传送到直流线路上^[10]。风电场侧换流站的控制策略如图 2 所示。从图 2 看出,网侧交流电压 U_{wf} 为测量值,对其进行

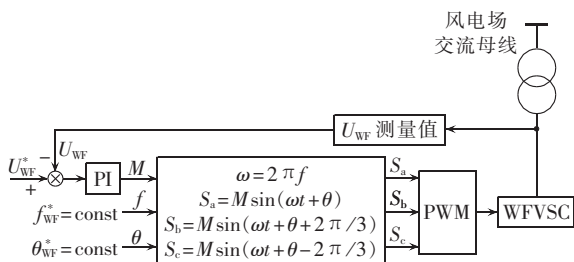


图2 风电场侧换流站的基本控制策略

Fig.2 Basic control strategy of WFFVSC

闭环调节,频率 \$f\$ 为定值。与基本的间接电流控制和直接电流控制相比,图 2 的控制策略要简单很多。

3.3 直流输电系统逆变器的基本控制

在混合直流输电系统中,直流电压需维持在一个稳定值上,直流电压过高或过低会引起系统的不正常运行^[11]。本文中,逆变侧的基本控制采取定直流电压控制,定直流电压控制可以保证系统稳定的有功功率传输。

根据式(2),假设直流电流 \$I_d\$ 不变,对其进行微分,如下式所示:

$$\frac{d}{dt} U_{d2} = -1.35 U_{c2} \sin \beta \frac{d}{dt} \beta = 1.35 U_{c2} \sin (\pi - \alpha) \frac{d}{dt} \alpha \quad (12)$$

设直流电压测量值 \$U_{d2}\$ 和整定值 \$U_{d2}^*\$ 之间的差值 \$\Delta U_{d2} = U_{d2} - U_{d2}^*\$,可得到:

$$\frac{d}{dt} \Delta U_{d2} = 1.35 U_{c2} \sin (\pi - \alpha) \frac{d}{dt} \alpha \quad (13)$$

控制系统的目标在于使 \$\Delta U_{d2}\$ 不断趋近于 0,则触发角可由式(14)进行 PI 调节得到。

$$\alpha = \pi - \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \Delta U_{d2} \quad (14)$$

4 逆变侧发生交流接地故障时直流系统的改进控制策略

若只采用基本控制策略,当受端交流系统为弱系统,并发生交流侧接地故障时,交流电压降低,直流电流升高, \$\mu\$ 值增大,易发生连续换相失败,难以从故障中恢复正常运行。针对上述问题,提出如图 3 所示的逆变器的改进控制策略:在逆变侧加入定关断角控制。\$\beta_1\$ 是定直流电压控制调制出的超前角, \$\beta_2\$ 是定关断角控制调制出的超前角。正常运行时,由于测量量 \$\gamma\$ 比整定值大, \$\beta_2\$ 的值较小,但 \$\beta_1\$ 在 \$30^\circ \sim 40^\circ\$ 之间,此时 \$\beta_1 > \beta_2\$, 定直流电压控制起作用;在故障发生后,关断角会变为 \$0^\circ\$, 此时, \$\beta_2\$ 会增大,而定直流电压控制却由于直流电压的减小, \$\beta_1\$ 也随之减小,当 \$\beta_2 > \beta_1\$ 时,定直流电压控制就转换为定关断角控制,定关断角控制会起到抑制关断角变小的作用,帮助系统恢复正常运行。

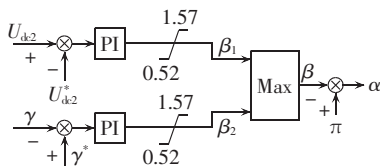


图3 LCC的控制策略

Fig.3 Control strategy of LCC

然而,仿真结果可证明,故障时逆变侧若只采取将定直流电压控制转换成定关断角控制,并不能使系统按照设计恢复正常运行。

若将式(5)代入式(3)中,可以得到式(15):

$$\mu = \arccos \left[\cos \gamma - \frac{2X_{L2}(U_{d1} - U_{d2})/R_d}{\sqrt{2} U_{c2}} \right] - \gamma \quad (15)$$

由式(15)可以得出:整流侧直流电压 \$U_{d1}\$ 也会对逆变侧换相角 \$\mu\$ 产生影响,即对换相失败也会产生影响。\$U_{d1}\$ 越小,换相角越小,对故障后的恢复有促进作用。

同时,考虑到在故障时也需要定直流电压控制来稳定系统有功功率的传输,本文中设定,当逆变侧的控制策略转换为定关断角控制策略时,即 \$\beta_2 > \beta_1\$ 时,由通信系统将信号 \$S < 0\$ 的状态发给整流站,在整流侧的控制策略中加入定直流电压控制,如图 4 所示。

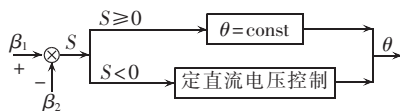


图4 VSC的控制转换图

Fig.4 Control conversion of VSC

由式(2)和式(7)可得式(16):

$$U_{d1} = 1.35 U_2 \cos \gamma + I_d \left(R_d - \frac{3}{\pi} X_{L2} \right) \quad (16)$$

设系统传输的有功功率不变,将 \$I_d = P_d / U_{d1}\$ 代入式(16)中,得到二次方程,整理得到下式:

$$U_{d1}^2 - 1.35 U_2 \cos \gamma U_{d1} - K = 0 \quad (17)$$

对式(17)取合理的解:

$$U_{d1} = [1.35 U_2 \cos \gamma + \sqrt{(1.35 U_2 \cos \gamma)^2 + 4K}] / 2 \quad (18)$$

其中, \$K = P_d \left(R_d - \frac{3}{\pi} X_{L2} \right)\$。

由式(18),可以根据受端电网交流电压 \$U_{c2}\$ 的下降程度,来设定整流侧定直流电压控制的整定值 \$U_{d1}^*\$。当交流电压降低到 0.95 p.u. 以下时, \$U_{d1}^*\$ 按式(18)取值,但如果整流侧直流电压过小,将导致无法支撑风电机组的运行。依据 VSC 的调节能力及风电机组的低电压穿越能力,整流侧直流电压定值的下限取 0.5 p.u.。额定功率下的逆变侧交流电压 \$U_{c2}\$ 和整流侧直流电压定值 \$U_{d1}^*\$ 之间的关系如图 5 所示。

上述 VSC 的改进控制策略是以短时降低直流系统电压、提升传输电流为出发点的。因此,该功能

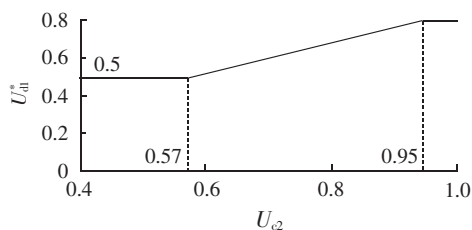


图 5 U_{d1}^* 与 U_{c2} 的关系曲线
Fig.5 Curve of U_{d1}^* vs. U_{c2}

的实现还应保证电流在混合直流输电设备的过流能力之内。风电场实时出力通常远小于输电设备的额定容量,因此,上述控制策略在大多数情况下是可用的。

此外,当风机的网侧交流电压降低时,会发生转子回路的过压和过流,为解决这一问题,本文采取在风机网侧换流器加入了 Crowbar 旁路,这个旁路导通时可以帮助转子电流快速衰减^[12]。

5 仿真验证及分析

本文在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中搭建了图 1 所示的基于 DFIG 的风电场经混合直流输电送出的仿真模型,仿真参数如下:直流电压为 ± 200 kV,额定有功功率为 300 MW,直流电流为 0.75 kA,系统频率为 50 Hz,逆变侧交流系统交流电压为 160 kV(短路比 SCR=2.5),逆变侧定直流电压的 $U_{dc}^*=400$ kV,逆变侧定关断角备用控制的 $\gamma^*=14^\circ$,风电场侧换流站定交流电压控制的 $U_{ac}=230$ kV。仿真主要针对两方面,首先考虑改变风速时,风电场侧换流站的功率跟踪能力,然后对逆变侧交流系统进行故障仿真,验证上述控制系统的控制性能。

5.1 风速变化的仿真

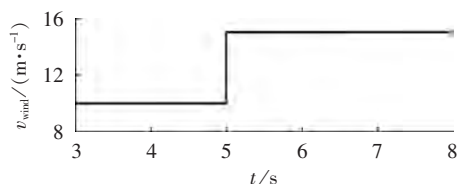
为了验证正常运行时,混合直流输电系统能够跟踪风速的变化而引起的有功功率变化,在仿真中的第 5 s 时,将原来的风速 10 m/s 提升到 15 m/s,观察流过风电场侧整流器的潮流变化。根据设置的参数进行仿真,仿真结果如图 6 所示。

从仿真结果可以看出,流过整流器的有功功率在第 5 s 的时间内,有功功率随着风速的增大而上升,无功功率也能维持在整定值附近。

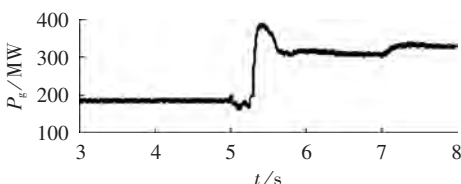
5.2 受端交流侧发生接地故障

正常运行时,风速设置为 15 m/s,风电场侧换流器输出的功率为 326 MW,交流电压稳定运行在 245 kV 定值上,直流电压稳定地运行在 ± 200 kV,逆变侧 LCC 定直流电压控制下的 $\beta_1=30.76^\circ$,定关断角控制下的 $\beta_2=29.8^\circ$, β_2 处于 PI 输出限制上,此时,逆变侧控制为定直流电压控制。在 4 s 时,加入故障,故障持续时间为 0.05 s。

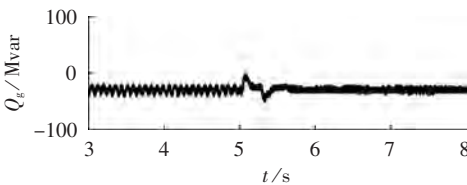
采用基本控制策略的交流系统发生单相接地故障仿真结果如图 7 所示。图中,风机转速为标么值,后同。从仿真结果可以看出,当采用基本控制策略时,



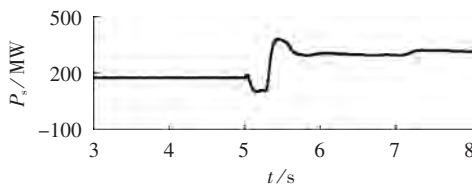
(a) 风速



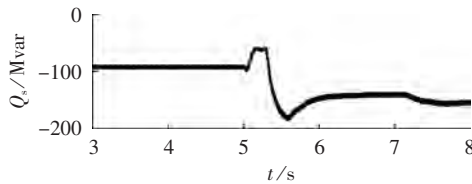
(b) 风电场输出的有功功率



(c) 风电场输出的无功功率



(d) 网侧换流器流过的有功功率



(e) 网侧换流器流过的无功功率

图 6 风电场侧换流器流过的有功和无功功率
Fig.6 Waveforms of active and reactive power transmitted through WFCVSC

由于受端交流系统为弱系统,关断角在故障消失后仍长时间保持为 0 的状态,发生连续换相失败,直流电压为 0。由于输电系统不能传输功率,风电场发出的功率送不出去,风电场出口的有功功率为 0,而风速是不变的,使得发电机的转速持续升高,由于系统在故障消失后不能恢复运行,转速会越来越大,如图 7(a) 所示。

下面将对故障下的改进控制策略进行仿真分析。图 8 为采用改进控制策略,逆变侧交流系统发生单相接地故障的仿真结果图,图 9 为采用改进控制策略,逆变侧交流系统发生三相接地故障的仿真结果图。

从图 8、图 9 可以看出,故障发生时,由于风电场母线的电压降低,使得风电场不能正常把有功功率输送到直流系统,导致有功功率降低,发电机转速短时升高;受端交流电压降低,直流电流会升高,逆变

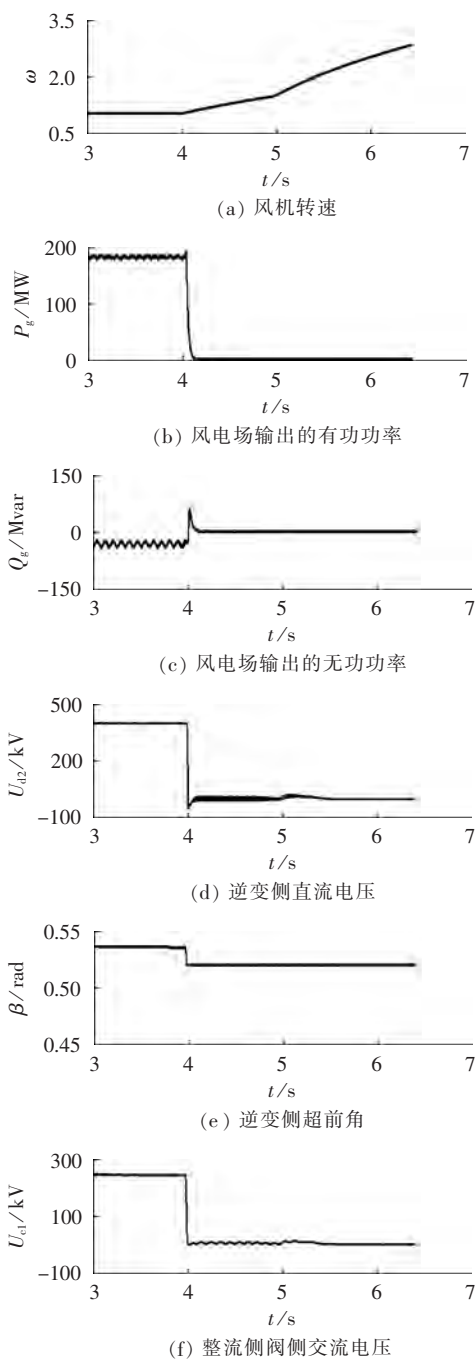


图 7 采用基本控制策略的逆变侧单相接地故障仿真结果

Fig.7 Simulative results of basic control strategy for single-phase grounding fault at inverter side

侧的直流电压会降低,定直流电压控制会减小超前角直到限值,而此时,关断角由于直流电流升高会减小,定关断角控制会增大超前角,此时定关断角控制起作用,同时,整流侧加入了定直流电压控制,抑制了换相失败。当故障消失一段时间后,系统恢复正常运行,而发电机转速也减小直到恢复正常值。将图 7 与图 8 的仿真结果进行比较,可以看出,改进的控制策略能够减少换相失败的次数,风电经混合直流输电送出(送端为 VSC,受端为 LCC)可以在保证经济性的前提下稳定运行。

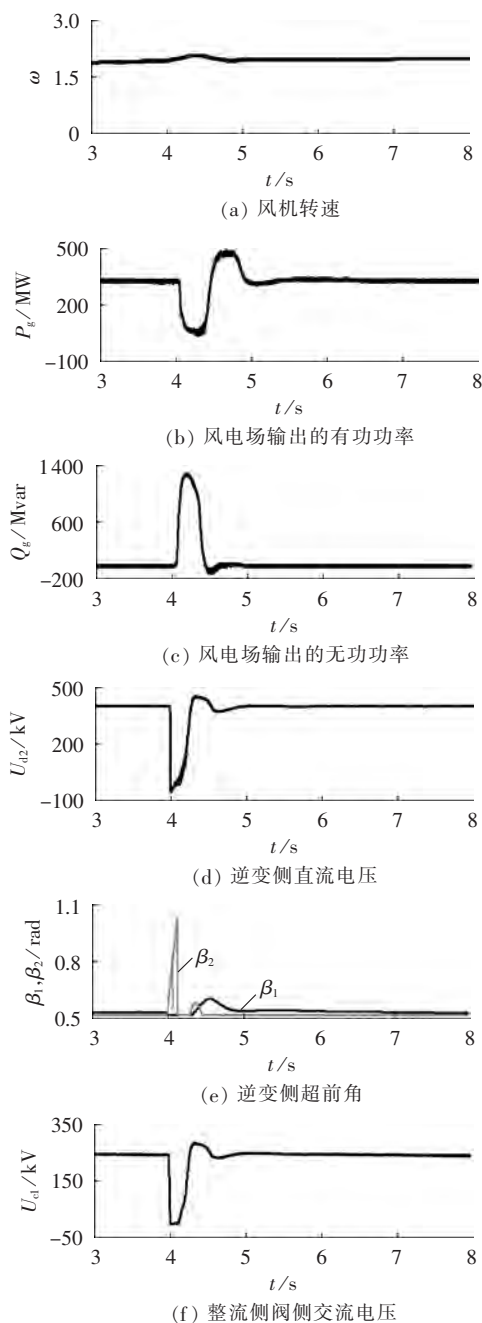
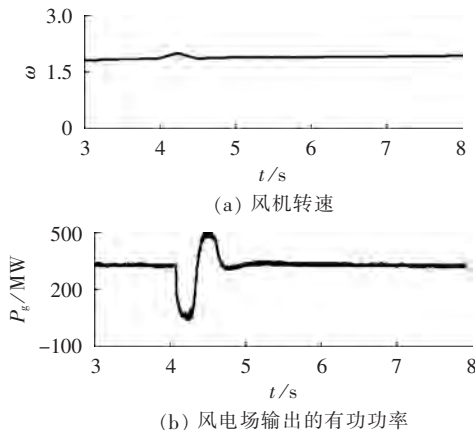


图 8 采用改进控制策略的逆变侧单相接地故障仿真结果

Fig.8 Simulative results of improved control strategy for single-phase grounding fault at inverter side



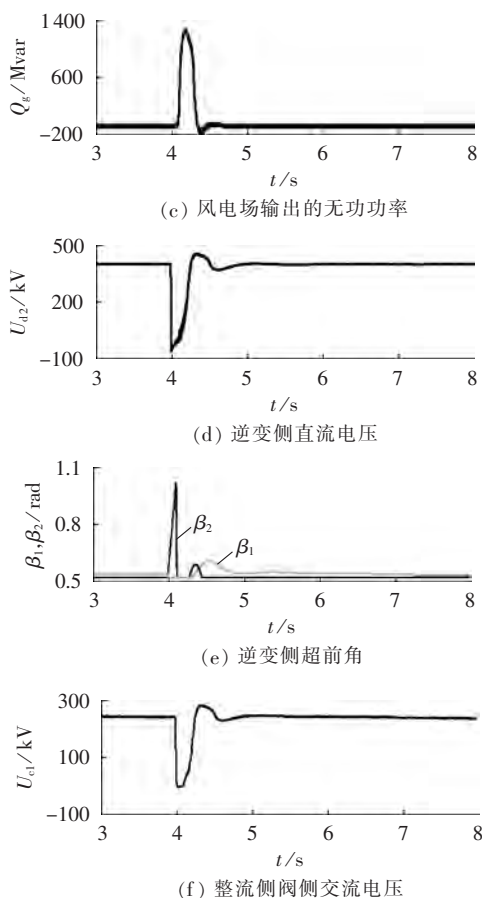


图 9 采用改进控制策略的逆变侧三相接地故障仿真结果
Fig.9 Simulative results of improved control strategy for three-phase grounding fault at inverter side

6 结论

本文对基于双馈风机的风电场联接混合直流输电系统的拓扑的结构特点进行了分析;提出了适合于图 1 的风电经混合直流输电送出的协调控制策略,使得混合直流输电的流通功率能够很好地跟踪风速的变化;提出了系统的改进控制策略,减少了逆变侧的换相失败次数;在 PSCAD/EMTDC 中按图 1 搭建了基于 DFIG 的风电场经混合直流输电送出的仿真模型,对风电和混合直流输电协调控制策略以及发生故障时减少发生换相失败次数的改进控制策略进行了仿真分析,分析结果表明,混合直流输电系统能够跟踪风速的变化,同时在逆变侧发生接地故障时,系统能够快速恢复正常运行。

致 谢

本文研究工作得到国家电网公司“混合直流输电前期研究”项目的资助。在此致以衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 韩民晓,文俊,徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京:机械工业出版社,2009:92-93.
- [2] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004:1-39.
- [3] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010:1-25.
- [4] 李广凯,李庚银,梁海峰,等. 新型混合直流输电方式的研究[J]. 电网技术,2006,30(4):82-86.
- LI Guangkai,LI Gengyin,LIANG Haifeng,et al. Research on a novel hybrid HVDC system[J]. Power System Technology,2006,30(4):82-86.
- [5] 周宏林,杨耕,耿华. 远距离大型 DFIG 风电场的混合型 HVDC 建模及控制[J]. 电工技术学报,2010,25(2):124-131.
- ZHOU Honglin,YANG Geng,GENG Hua. Modeling and control for DFIG-based wind farm with hybrid HVDC connection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(2):124-131.
- [6] TORRES-OLGUIN R E,MOLINAS M,UNDELAND T. Hybrid HVDC connection of large offshore wind farms to the AC grid [C]//2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Hangzhou,China:IEEE,2012:1591-1597.
- [7] 孙长江,施刚,彭思敏. 混合型高压直流输电系统及其控制策略 [C]//首届直流输电与电力电子专委会学术年会. 北京:中国电机工程学会,2012:1106-1113.
- [8] 罗隆福,雷园园,李勇,等. 定熄弧角控制器对直流输电系统的影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2009,21(5):97-103.
- LUO Longfu,LEI Yuanyuan,LI Yong,et al. Effects of constant arc extinguishing angle controller on HVDC transmission system [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA,2009,21(5):97-103.
- [9] 刘其辉,贺益康,赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制[J]. 电力系统自动化,2003,27(20):62-67.
- LIU Qihui,HE Yikang,ZHAO Rende. The maximal wind-energy tracing control of variable-speed constant-frequency wind-power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(20):62-67.
- [10] XU L,YAO L,SASSE C. Grid integration of large DFIG-based wind farms using VSC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(3):976-984.
- [11] 杨思祥,李国杰,阮思烨,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.
- [12] 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.
- [13] TORRES-OLGUIN R E,MOLINAS M,UNDELAND T M. A model-based controller in rotating reference frame for hybrid HVDC [C]//2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Atlanta,USA:IEEE,2010:1578-1584.
- [14] 田杰. 高压直流控制保护系统的设计与实现[J]. 电力自动化设备,2005,25(9):10-14.
- TIAN Jie. Design and realization of HVDC control and protection system[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(9):10-14.
- [15] 薛英林,徐政,潘武略,等. 电流源型混合直流输电系统建模与仿真[J]. 电力系统自动化,2012,36(9):98-103.
- XUE Yinglin,XU Zheng,PAN Wulue,et al. Modeling and simu-

- lation for a hybrid current source converter high voltage direct current transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 98-103.
- [16] 欧开健,任震,荆勇. 直流输电系统换相失败的研究(一)——换相失败的影响因素分析[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 5-8. OU Kaijian, REN Zhen, JING Yong. Research on commutation failure in HVDC transmission system part 1: commutation failure factors analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(5): 5-8.
- [17] 袁阳,卫志农,雷霄,等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 140-147. YUAN Yang, WEI Zhinong, LEI Xiao, et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 140-147.
- [18] FOSTER S, XU L, FOX B. Control of an LCC HVDC system for connecting large offshore wind farms with special consideration of grid fault[C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, USA: IEEE, 2008: 1-8.
- [19] 周宏林,杨耕. 用于大型DFIG风电场的混合型HVDC系统中整流器的建模与控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 224-232. ZHOU Honglin, YANG Geng. Modeling and control for rectifier in the hybrid-HVDC system for DFIG-based wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 224-232.
- [20] ZHAO Z, IRAVANI M R. Application of GTO voltage source inverter in a hybrid HVDC link[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1): 369-377.
- [21] IWATA Y, TANAKA S, SAKAMOTO K, et al. Simulation study of a hybrid HVDC system composed of a self-commutated converter and a line-commutated converter[C]//Sixth International Conference on AC and DC Power Transmission. [S.l.]: IET, 1996: 381-386.
- [22] 朱颖,李建林,赵斌. 双馈型风力发电系统低电压穿越策略仿真[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 20-24. ZHU Ying, LI Jianlin, ZHAO Bin. Simulation of LVRT strategy for DFIG wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6): 20-24.
- [23] KOTB O, SOOD V K. A hybrid HVDC transmission system supplying a passive load[C]//2010 IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC). Halifax, Canada: IEEE, 2010: 1-5.
- [24] TORRES-OLGUIN R E, MOLINAS M, UNDELAND T. A direct power control for hybrid HVDC transmission systems[C]//PowerTech, 2011 IEEE Trondheim. Trondheim, Norway: IEEE, 2011: 1-6.

作者简介:



翟冬玲

翟冬玲(1989—),女,黑龙江佳木斯人,硕士研究生,从事高压直流输电和新能源并网技术的研究(E-mail:zhaidongling2008@126.com);

韩民晓(1963—),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力系统控制、电力电子技术和柔性化供电技术的研究。

Control of offshore DFIG-based wind farm with hybrid HVDC transmission

ZHAI Dongling¹, HAN Minxiao¹, YAN Wenli¹, SUN Xu²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: To reduce the cost of offshore wind power sending via VSC-HVDC (Voltage Source Converter-High Voltage Direct Current), a topological design is proposed for the DFIG (Doubly-Fed Induction Generator)-based offshore wind farm: farm-side VSC and inverter-side LCC (Line Commutated Converter). In order to ensure the stable operation in normal conditions and track the variable wind speed, the farm-side VSC adopts the constant AC voltage and given frequency control while the inverter-side LCC adopts the constant DC voltage control. As the continuous commutation failures may easily occur in the weak power system with fault, the constant extinction angle control is added as a backup control in the LCC control system. When the constant extinction angle control is initiated, the constant DC voltage control is added in the VSC control system to suppress the commutation failure. The offshore wind power sending via VSC-HVDC is simulated with PSCAD/EMTDC and the simulative results verify that, the hybrid HVDC power transmission system can track the variable power output of wind farm, the conversion of coordination control strategy can reduce the commutation failure times to ensure the system recovery during AC-side fault.

Key words: wind power; HVDC power transmission; DFIG-based wind turbine; VSC; LCC; commutation failure