

基于 STATCOM 和 LCC-MTDC 技术的大规模风电并网技术研究

李广磊¹, 李笋², 孙树敏¹, 程艳¹, 陈霞³, 郑雪阳³, 文劲宇³

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250002; 2. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001;
3. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074)

摘要: 以西北电网千万千瓦级风场为背景, 提出了采用相控换流器与 STATCOM 结合的多端直流输电技术进行大规模风电并网的方法。从两个层面上进行控制器的设计, 一是从含有 STATCOM 的整流器交流侧子系统角度, 针对策略的快速响应能力以及良好的控制特性。STATCOM 非线性特性, 引入逆系统方法设计其控制器并推导整流器直流侧电流与 STATCOM 直流侧电压的关系, 提出适合于整流器的控制策略, 保证交流侧功率平衡。其次从 MTDC 整体性能出发, 设计相应的控制策略来确保系统稳定运行。在 PSCAD/EMTDC 中的仿真结果验证了所提控制策略的快速响应能力以及良好的控制特性。

关键词: 相控换流器; 多端直流输电; 双馈发电机; 风电场; 静止同步补偿器

Research on LCC-MTDC and STATCOM technology for wind farms integration

LI Guang-lei¹, LI Sun², SUN Shu-min¹, CHENG Yan¹, CHEN Xia³, ZHENG Xue-yang³, WEN Jin-yu³

(1. Shandong Electric Power Research Institute of State Grid, Jinan 250002, China; 2. Shandong Electric Power Company of State Grid, Jinan 250001, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (AET) (School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper proposes the line-commutated converter based multi-terminal HVDC (LCC-MTDC) combining with the static synchronous compensator (STATCOM) for doubly-fed induction generator (DFIG) based wind farms integration in the context of Northwest Grid (NG) in China. The control strategies design is approached from two aspects. One aims to the AC system on the rectifier side. To coordinate the wind farm, STATCOM and rectifier, the inverse system method is introduced to design the controller in view of the nonlinear characteristic of STATCOM. Meanwhile, the control strategy for the rectifier is proposed to balance the active power in the subsystem and ensure the DC link voltage of STATCOM constant. On the other hand, the single-point voltage control strategy suitable for LCC-MTDC is conceived to guarantee the stable operation of the system by considering the control characteristics of both rectifiers and inverters. Simulations carried out in PSCAD/EMTDC have proven that the proposed control strategies possess favorable control performance and fast response speed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51261130484).

Key words: line-commutated converter; multi-terminal HVDC; DFIG; wind farm; STATCOM

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)05-0032-08

0 引言

2008 年以来, 国家能源局已相继完成了对甘肃、新疆、河北、蒙东、蒙西、吉林、江苏沿海地区千万千瓦级风电基地的规划工作。由于规划的大型风电基地处于电网末端, 电网网架结构较薄弱,

电源结构较为单一, 风电大规模接入对这些地区电网稳定运行带来了很大压力。与此同时, 电网建设难以适应风电容量快速增加的步伐, 加之风电随机性和间歇性等特点使得目前风电基地面临风电出力受限严重的问题^[1]。从长远角度考虑, 现有交流并网技术即便采用加装串补和可控高抗等多项技术措施仍无法满足未来大规模(10 GW 水平以上)远距离(1 000 km 以上)风电送出要求^[2]。

基于晶闸管相控换流器的直流输电 (Line

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51261130484); 国家电网公司专项支持(项目批准号: 国家电网科研 2013-304)

Commutated Converter HVDC, LCC-HVDC) 技术发展成熟, 从运行成本及运行可靠性角度而言, 相对于交流输电技术具有很大优势^[3-4]。而与基于电压源型换流器的新型高压直流输电 (VSC-HVDC) 技术相比, 具有输送功率等级高, 损耗低等特点, 因此很适合应用在远距离大规模的输电场合^[5-6]。

目前越来越多的风场使用变速恒频运行的双馈感应发电机 (Double Fed Induction Generator, DFIG) 技术^[7], 大规模风电采用基于上述相控换流器的直流输电进行并网时, 与风场相连的 LCC-HVDC 视为无源负载, 若在并网点 (Point of Common Coupling, PCC) 没有较强的交流电压源存在, 则不能保证晶闸管换流器正常换向^[8]。同时, 由于没有外部电压源支撑, 定子励磁磁场不能成功建立, 双馈风力发电机存在启动方面的问题^[9]。静止同步补偿器 (Static Synchronous Compensator, STATCOM) 因其响应速度快, 暂态条件下能够提供良好的无功功率响应, 从而扩大风电场无功运行范围并保证并网点电压水平^[10-12]。风电场采用高功率等级 LCC-HVDC 与小容量 STATCOM 相结合的并网拓扑结构比单独使用 VSC-HVDC 技术并网在成本和功耗方面具有较大优势^[13]。尽管 DFIG 本身可以向电网提供一定量的无功支撑, 但是风场距离并网点往往有一定距离, 无功不能就地进行补偿, 其远距离的输送会带来较大损耗, 因此在本文中未作考虑。

本文在提出多端直流输电技术用于风场并网的拓扑图的基础上。针对 STATCOM 非线性特性, 引入逆系统方法设计了 STATCOM 的控制器。通过分析 STATCOM 直流母线电压与整流器交流侧子系统电流之间的关系, 构造出适合整流器的控制器。从整流器和逆变器控制特性出发, 设计了多端直流系统整体运行控制策略。最后通过对风功率波动及整流器侧故障的仿真验证了所提出控制策略的有效性。

1 系统结构

鉴于多端直流输电系统 (Multi-terminal HVDC, MTDC) 能够提供一种灵活可靠的输电方式, 实现多电源供电、多落点受电^[14-15]。本文根据西北电网 2015 年规划, 即在新疆哈密和甘肃酒泉建立两大千万千瓦级风场, 采用基于相控换流技术的多端直流将这两个分布在不同地区的风电场进行联网, 共同向受端负荷中心郑州和泰州供电。如图 1 所示, 800 kV 直流联络线将拟建的两个 HVDC 输电工程互联成多端系统。风电由基于 DFIG 的两大风场汇集后

送出, 经过升压、整流环节后由 800 kV 高压直流输电线路送至逆变侧并馈入负荷中心, 系统结构具体参数可参见文献[16]。与文献[16]相比, 并网点接入容量为风场 30%~40% 的 STATCOM 而不是等效交流电源, 借助于 STATCOM 可为相控换流器提供换相电压并为 DFIG 提供励磁电源。各个换流站中均根据配备了滤波器、平波电抗器及换流变压器, 确保换流站正常工作。

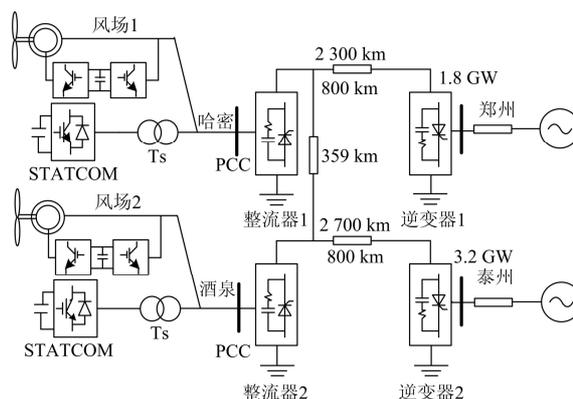


图 1 四端 800 kV 直流输电系统结构图

Fig. 1 Four-terminal 800 kV HVDC configuration

2 系统建模及控制

总体而言, 含风场的四端直流输电系统的控制可以分为两部分: 多端直流系统换流器之间的控制, 用以确保四端系统稳定运行, 使得功率按照运行指令顺利从整流侧输送到逆变侧并馈入受端电网; 另一方面, 需要对风场、整流器以及 STATCOM 之间进行协调控制, 保证风场发出的功率与送至整流侧功率之间的平衡。STATCOM 维持并网点母线电压频率和幅值, 保证相控换流器顺利换相; 整流器控制目标是跟踪风场输出有功功率, 将有功全部送至高压直流系统中, 保证整流器交流侧子系统功率平衡。

2.1 整流器交流侧子系统模型

整流器侧子系统示意图如图 2 所示, PCC 并网点交流母线电压用 U_G 表示; STATCOM 交流侧输出电压为 U_s , 直流侧电压为 E_{s0} 。风场向 PCC 并网点注入电流 I_G , 从 PCC 点流出至 HVDC 整流器的电流为 I_c 。不同运行工况下, STATCOM 交流侧电流 I_s 流向可变。 C_s 为 STATCOM 直流侧电容; L_s 和 R_s 表示 STATCOM 升压变压器电感及电阻; L_c 和 R_c 表示整流器换流变压器内电抗和电阻。从并网点来看, 风场、STATCOM 及整流器变量之间的关系可表示如式 (1)。

$$\begin{cases} L_s \frac{dI_s}{dt} = -R_s I_s + U_s - U_G \\ L_c \frac{dI_c}{dt} = -R_c I_c + U_G - U_c \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$$U_s = [U_{as} \quad U_{bs} \quad U_{cs}]^T, \quad U_G = [U_{aG} \quad U_{bG} \quad U_{cG}]^T;$$

$$I_s = [I_{as} \quad I_{bs} \quad I_{cs}]^T, \quad I_c = [I_{ac} \quad I_{bc} \quad I_{cc}]^T。$$

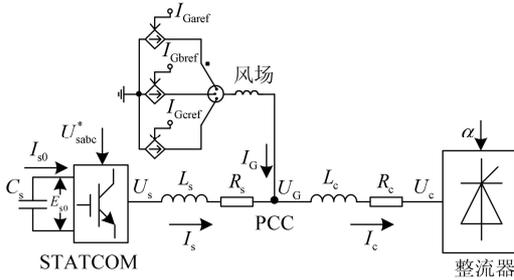


图 2 整流侧子系统示意图

Fig. 2 Subsystem diagram on the rectifier side

2.2 风场建模

为简化建模复杂性,大型风场采用 DFIG 聚集模型表示,向电网注入功率。由于 DFIG 输出有功和无功均可以通过控制转子侧电流 dq 轴分量来实现,在并网点母线电压 U_G 幅值和相位均可控的前提下,根据风场所需期望输出的有功和无功设定风场输出理想电流源的 dq 轴分量参考值,然后再通过两相到三相旋转变换,用最终形成三相受控电流源来表示 DFIG 模型。如图 3 所示, I_{Gdref}^* 表示风场有功功率控制量,设定值根据风场输出有功功率的变化而变化。 I_{Gqref}^* 表示无功功率控制量,在风场与电网无功交换为 0 的情况下,其值设置为 0,即系统动态无功仅由 STATCOM 来提供。旋转变换角度 θ_1 可以由同步锁相环 PLL 获取,数值 K 为不同功率水平下对应的相电流幅值。

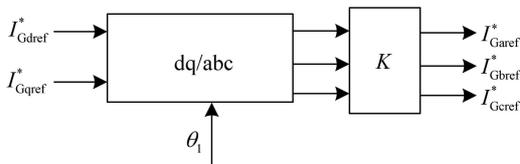


图 3 风场简化建模

Fig. 3 Modeling of wind farm

2.3 STATCOM 建模及控制

STATCOM 控制目标是为 PCC 并网点母线提供无功支撑,保证母线电压恒定。从 STATCOM 数学

模型可以得到 STATCOM 系统是一个具有非线性的交叉耦合系统^[17-18],逆系统方法作为解决非线性问题的一种方法可用于 STATCOM 控制器的设计。

逆系统的基本原理可以如下描述^[19-20]:对于一个给定的系统 A ,其输入为 $u(t)$,输出为 $y(t)$,用来描述系统的因果关系的因子用 θ 表示,则 A 系统可以表示为

$$y = \theta u \quad (2)$$

将原系统 A 的逆系统定义为 A° , A 系统的逆系统 A° 实际是可以根据某些预期的 A 的输出 $y_d(t)$,通过使其作为系统 A° 的输入来产生出需要加到系统 A 输入端的控制 u_d ,以驱动原系统 A 产生事先所希望的输出 $y(t)=y_d(t)$ 。逆系统特性如图 4 所示。

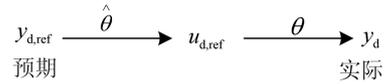


图 4 逆系统特性

Fig. 4 Characteristic for inverse system

STATCOM 子系统控制目标是通过控制其输出交流电压 U_s 来获取理想的并网点母线电压 U_G 。式

(1) 经三相/两相旋转变换后,可得三相电压 U_s 和 U_G 在以角频率 ω 旋转的 dq 坐标系下的表达式为

$$\begin{cases} U_{Gd} = U_{sd} - L_s \frac{dI_{sd}}{dt} - R_s I_{sd} + \omega L_s I_{sq} \\ U_{Gq} = U_{sq} - L_s \frac{dI_{sq}}{dt} - R_s I_{sq} - \omega L_s I_{sd} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可得 STATCOM 逆系统数学模型为

$$\begin{cases} U_{sd} = U_{Gd} + L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + R_s I_{sd} - \omega L_s I_{sq} \\ U_{sq} = U_{Gq} + L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + R_s I_{sq} + \omega L_s I_{sd} \end{cases} \quad (4)$$

微分项在暂态过程中会产生较大的影响,实际上达到稳态后, I_{sd} 和 I_{sq} 会保持不变,因此可忽略微分项的作用。将逆系统作为前馈控制,STATCOM 控制方案如图 5 所示。

图 5 中, STATCOM 交流侧电流 I_{sd} 和 I_{sq} 可测, L_s 和 R_s 为已知量。在 dq 旋转坐标系下,通过控制交流侧母线电压的 d 轴分量等于给定, q 轴分量等于零来实现对母线电压幅值和相位的控制。母线电压 U_G 在理想控制条件下的控制值 $U_{Gd}^* = 1 \text{ p.u.}$ 和 $U_{Gq}^* = 0$ 作为逆系统输入,经过逆系统后得到的理想电压指令 U_{sd}^* 和 U_{sq}^* 作为原系统输入,从而实现控制 PCC 母线电压 U_{Gd} 和 U_{Gq} 的目的。具体的控制结构如图 6 所示。

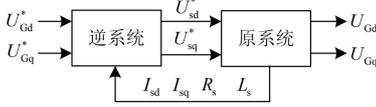


图 5 逆系统控制器设计

Fig. 5 Controller design by inverse system

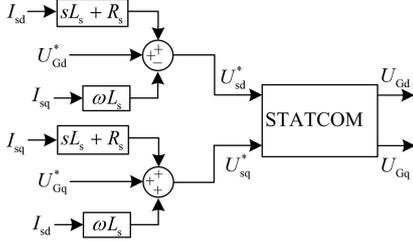


图 6 STATCOM 逆系统具体控制方案

Fig. 6 Detailed control scheme for STATCOM

2.4 整流器建模及控制

为保证 STATCOM 正常工作, 须保证其直流侧电压恒定, 因此直流侧电压必须受控。由 STATCOM 控制特性可知, 它的两个控制自由度分别用于控制母线电压幅值和相位恒定, 其直流侧电压的控制必须另寻其控制变量。在本节推导了 STATCOM 直流侧电压和整流侧直流控制变量之间的关系, 以达到通过对整流器的控制来控制 STATCOM 直流侧电压的目的。

$$P_s = I_{s0} E_{s0} = \frac{3}{2} (U_{sd} I_{sd} + U_{sq} I_{sq}) \quad (5)$$

又 $I_{s0} = C_s \frac{dE_{s0}}{dt}$, 可得

$$P_s = \frac{1}{2} C_s \frac{dE_{s0}^2}{dt} = \frac{3}{2} (U_{sd} I_{sd} + U_{sq} I_{sq}) \quad (6)$$

式中: I_{s0} 为 STATCOM 直流侧电容电流; E_{s0} 为 STATCOM 直流电容电压。

理想工况下, 稳态时系统有功功率平衡表达式为

$$P_s + P_G = P_C \quad (7)$$

将式 (6) 代入式 (7) 可得

$$\frac{1}{2} C_s \frac{dE_{s0}^2}{dt} = P_C - P_G \quad (8)$$

由式 (8) 可得

$$E_{s0}^2 = \frac{2}{C_s} \int (P_C - P_G) dt \quad (9)$$

当输送直流功率 P_C 大于风场发出功率 P_G 时, STATCOM 将输出有功功率, 其直流侧电压 E_{s0} 会下降; 当 P_C 小于 P_G , STATCOM 吸收有功功率, E_{s0} 将上升。由此可见, 整流侧交流子系统中出现的任

何有功功率不平衡都将导致 STATCOM 直流侧电压发生波动, 为了维持有功功率平衡, 所设计的控制器可以以保持 STATCOM 直流侧电压恒定为控制目标。由于整流器可以通过控制触发角 α 来增大或减小输送功率 P_C , 使系统有功重新恢复平衡, 因此可选定触发角 α 为最终控制对象。

进一步分析

$$\frac{1}{2} C_s \frac{dE_{s0}^2}{dt} = \frac{3}{2} (U_{sd} I_{sd} + U_{sq} I_{sq}) = \quad (10)$$

$$\frac{1}{2} L_s \frac{dI_s^2}{dt} + R_s I_s^2 + \frac{3}{2} (U_{Gd} I_{Gd} + U_{Gq} I_{Gq})$$

忽略 STATCOM 电阻及电感损耗, 可得

$$\frac{1}{2} C_s \frac{dE_{s0}^2}{dt} = \frac{3}{2} (U_{Gd} I_{Gd} + U_{Gq} I_{Gq}) \quad (11)$$

式 (11) 在 dq 坐标系下可写成

$$C_s \frac{dE_{s0}^2}{dt} = 3 (U_{Gd} I_{sd} + U_{Gq} I_{sq}) \quad (12)$$

PCC 点母线电压在理想控制条件下有

$$U_{Gd} = U_G, \quad U_{Gq} = 0$$

式 (12) 可写成

$$C_s \frac{dE_{s0}^2}{dt} = 3 U_{Gd} I_{sd} \quad (13)$$

其中: $I_{sd} = I_{cd} - I_{Gd}$, 可得

$$C_s \frac{dE_{s0}^2}{dt} = 3 U_{Gd} (I_{cd} - I_{Gd}) \quad (14)$$

对于整流器, 功率平衡条件下可得

$$E_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2} (U_{cd} I_{cd} + U_{cq} I_{cq}) \quad (15)$$

其中, I_{dc} 和 E_{dc} 为整流器直流侧电流和电压。

交流侧功率及电压在 dq 同步旋转坐标系下的数学方程为

$$\begin{cases} U_c I_c = \frac{3}{2} (U_{cd} I_{cd} + U_{cq} I_{cq}) \\ U_c = \sqrt{(U_{cd}^2 + U_{cq}^2)} \end{cases} \quad (16)$$

直流侧电压与整流器交流侧电压关系为

$$E_{dc} = N_1 (1.35 U_c \cos \alpha) \quad (17)$$

其中, N_1 为六脉波换流器个数。

将同步旋转坐标系下的 d 轴准确定向于整流器交流侧电压空间矢量方向上, 则有: $U_{cd} = U_c$, $U_{cq} = 0$, 结合式 (16)、式 (17), 代入式 (15) 可得

$$E_{dc} I_{dc} = N_1 \left(1.35 \sqrt{(U_{cd}^2 + U_{cq}^2)} \cos \alpha \right) I_{dc} \quad (18)$$

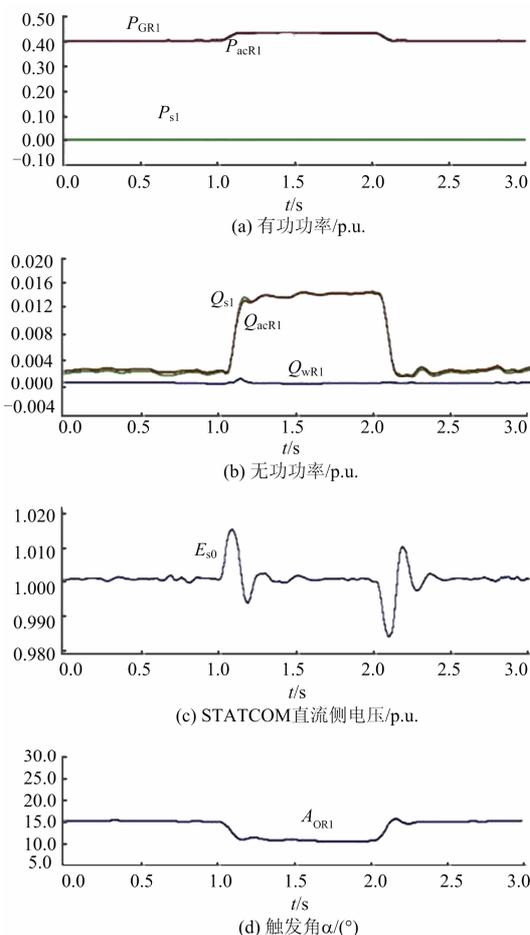


图 9 风场 1 输出功率波动——整流器 1 侧响应曲线
Fig. 9 Step change of wind farm 1 output power for REC1

风功率阶跃变化时, 换流器直流侧响应曲线如图 10 所示。风场输出功率增加时, 直流线路上较大的电压降落导致逆变器侧直流电压略有下降, 如图 10 (a) 所示。在控制器作用下, 整流器 1 输送功率增加, 将风场增加的风功率及时送出, 如图 10 (c) 所示。作为功率平衡器的逆变器 2 馈入电网的功率也相应提高, 维持直流系统功率平衡。换流器电流变化曲线与功率曲线趋势相同。

3.2 整流器 2 交流侧故障

1 s 时在整流器 2 交流侧施加持续时间为 100 ms 的三相短路故障, 仿真结果见图 11、图 12。整流器 2 交流侧电压急剧下跌造成直流侧电压下降。图 11 (a) 中, 整流器 2 输送功率减少至 0, 整流器 1 为了补偿整流侧功率减少, 直流电流临时性上升。整流器 1 侧交流电压有所下降, 导致风场输出有功功率减少, 然而风场输出有功功率仍比整流器 1 输送功率大, STATCOM 将吸收部分有功功率, 其直流侧电压上升, 如图 11 (c) 所示。此时整流器触发角将增大, 以减少整流器往直流系统注入的功率,

如图 11 (d) 所示。风场在故障期间无功功率始终控制为 0, 而触发角的增大使得整流器子系统消耗的无功大大增加, STATCOM 动态补偿这部分无功功率, 如图 11 (b) 所示。

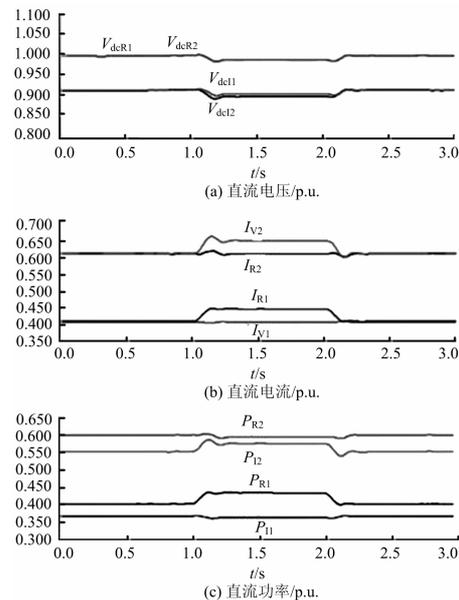


图 10 风场 1 输出功率波动——换流器响应曲线
Fig. 10 Step change of wind farm 1 output power for converters

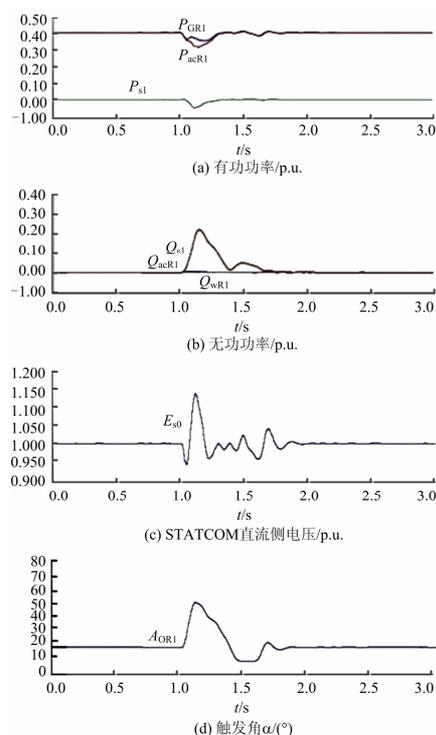


图 11 整流器 2 交流侧故障——整流器 1 侧响应曲线
Fig. 11 AC fault on the AC side of the rectifier 2 for REC1

直流系统的响应如图 12 所示，整流器 2 交流侧故障引起直流系统电压下跌如图 12 (a) 所示，整流器 2 直流电流迅速减小，注入直流网络中的电流随之减少，如图 12 (b) 所示，整流器 1 试图通过增加直流电流来补偿整流器 2 减少的输送功率。故障期间，直流系统输送功率出现短时中断，如图 12 (c) 所示。故障清除后，多端系统直流电压逐渐恢复，换流器继续输送功率，系统返回到正常运行状态。

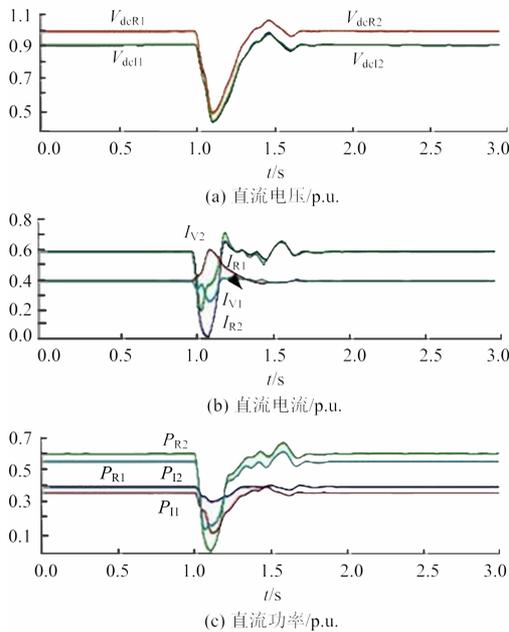


图 12 整流器 2 交流侧故障——换流器响应曲线

Fig. 12 AC fault on the AC side of the rectifier 2 for converters

4 结论

本文针西北大规模风场特点，提出了一种基于相控换流器与 STATCOM 结合的多端直流输电拓扑图。通过对各个子系统的建模分析，设计了 STATCOM、整流器和 MTDC 的控制策略。其中，引入了非线性控制逆系统方法用于 STATCOM 控制器设计，保证了 STATCOM 有效地为系统提供动态无功支撑。仿真结果验证了所提控制策略快速响应能力以及含风电的多端系统具有良好的稳态和动态控制特性。

附录

STATCOM 参数:

直流侧电容: $C_s = 1\ 000\ \mu\text{F}$,

直流侧电压: $E_s = 40\ \text{kV}$,

交流侧连接电抗: $L_s = 400\ \mu\text{H}$,

SVPWM 开关频率 $1\ 000\ \text{Hz}$,

升压变压器: $25\ \text{kV}/363\ \text{kV}$, $363\ \text{kV}/795\ \text{kV}$, $x=0.1\ \text{p.u.}$

控制器参数 (1)

参数	STATCOM	REC1	REC2
	Voltage loop	Current loop	Current loop
比例	0.3	1	1
积分	0.05	0.02	0.02

控制器参数 (2)

参数	INV1	INV2	INV1	INV2
	(Current)	(Current)	(Gama)	(Gama)
比例	1.5	1.5	0.750 6	0.750 6
积分	0.01	0.01	0.054 4	0.054 4

参考文献

- [1] 薛志英, 周明, 李庚银, 等. 大规模风电接入电力系统备用决策评述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 148-155.
XUE Zhi-ying, ZHOU Ming, LI Geng-yin, et al. Survey on reserve decision of power systems with large scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 148-155.
- [2] 肖创英, 汪宁渤, 丁坤, 等. 甘肃酒泉风电功率调节方式的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 1-7.
XIAO Chuang-ying, WANG Ning-bo, DING Kun, et al. System power regulation scheme for Jiuquan Wind Power Base[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 1-7.
- [3] XU Lie, ANDERSEN B R. Grid connection of large offshore wind farms using HVDC[J]. Wind Energy, 2006(4): 371-382.
- [4] KUNDER P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [5] 李国庆, 张健. 含 VSC-HVDC 的交直流系统可用输电能力计算[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 46-52.
LI Guo-qing, ZHANG Jian. Available transfer capability calculation for AC/DC systems with VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 46-52.
- [6] 解大, 解蕾, 张延迟, 等. 连接海上风电场的基于直接功率控制的三电平 VSC-HVDC[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 98-104.
XIE Da, XIE Lei, ZHANG Yan-chi, et al. Three-level VSC-HVDC based on direct power control connecting offshore wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 98-104.
- [7] 贾俊川, 刘晋, 张一工. 双馈风力发电系统的新型无功优化控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30): 87-92.

- JIA Jun-chuan, LIU Jin, ZHANG Yi-gong. Novel reactive power optimization control strategy for doubly fed induction wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(30): 87-92.
- [8] BOZHKO S V, BLASCO-GIMENEZ R, LI Ri-sheng. Control of offshore DFIG-based wind farm grid with line-commutated HVDC connection[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 71-78.
- [9] LI Ri-sheng, SERHIY B, GREG A. Frequency control design for offshore wind farm grid with LCC-HVDC link connection[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2008, 23(3): 1085-1092.
- [10] CHONG Han, HUANG A Q, BARAN M E, et al. STATCOM impact study on the integration of a large wind farm into a weak loop power system[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2008, 23(1): 226-233.
- [11] 李海琛, 刘明波, 林舜江. 考虑暂态电压安全的 STATCOM 安装地点选择和容量优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 69-80.
- LI Hai-chen, LIU Ming-bo, LIN Shun-jiang. Selection of STATCOM's installation site and capacity optimization considering transient voltage security[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 69-80.
- [12] XU Lie, YAO Liang-zhong, SASSE C, et al. Comparison of using SVC and STATCOM for wind farm integration[C] // International Conference on Power System Technology, 2007.
- [13] 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(12): 124-131.
- ZHOU Hong-lin, YANG Geng, GENG Hua. Modeling and control for DFIG-based wind farm with hybrid HVDC connection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 124-131.
- [14] HAMMAD A, MINGHETTI R, HASLER J, et al. Controls modeling and verification for the pacific intertie HVDC 4-terminal scheme[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(1): 367-375.
- [15] 文劲宇, 陈霞, 姚美齐, 等. 适用于海上风场并网的混合多端直流输电技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 55-61.
- WEN Jin-yu, CHEN Xia, YAO Mei-qi, et al. Offshore wind power integration using hybrid multi-terminal HVDC technology[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 55-61.
- [16] CHEN Xia, LIN Wei-xing, SUN Hai-shun, et al. LCC based MTDC for grid integration of large onshore wind farms in Northwest China[C] // IEEE PES General Meeting 2011, July 24-29, 2011.
- [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): 158-162.
- FAN Gao-feng, CHI Yong-ning, ZHAO Hai-xiang, et al. Transient voltage stability enhancement of wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(11): 158-162.
- [18] 查晓明, 张茂松, 孙建军. 链式 D-STATCOM 建模及其状态反馈精确线性化解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 107-113.
- ZHA Xiao-ming, ZHANG Mao-song, SUN Jian-jun. Decoupled state variable feedback linearization control[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 107-113.
- [19] 魏文辉, 刘文华, 宋强, 等. 基于逆系统方法有功-无功解耦 PWM 控制的链式 STATCOM 动态控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 23-28.
- WEI Wen-hui, LIU Wen-hua, SONG Qiang, et al. Research on fast dynamic control of static synchronous compensator using cascade multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 23-28.
- [20] 李春文, 冯元现. 多变量非线性控制的逆系统方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991: 20-26.
- LI Chun-wen, FENG Yuan-xian. Invertibility of multivariable nonlinear control systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991: 20-26.
- [21] 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [22] 李韬, 陈增强, 张纪峰. 比例积分型广义预测控制系统的稳定性分析[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(1): 19-24.
- LI Tao, CHEN Zeng-qiang, ZHANG Ji-feng. Stability analysis of systems with proportional integral generalized predictive control[J]. Control Theory and Applications, 2007, 24(1): 19-24.
- [23] 陈霞, 林卫星, 孙海顺, 等. 基于多端直流输电的风电并网技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 60-67.
- CHEN Xia, LIN Wei-xing, SUN Hai-shun, et al. LCC-MTDC technology for wind farms integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 60-67.

收稿日期: 2013-11-04

作者简介:

李广磊(1985-), 男, 硕士, 研究领域为新能源发电, 分布式发电及微网运行技术; E-mail: lovexjtulgl@126.com

李笋(1985-), 男, 学士, 助理工程师, 主要从事电网运行管理, 电网接入运行控制等;

孙树敏(1968-), 男, 硕士, 研究领域为新能源并网技术, 电力电子技术等。