

DOI: 10.7667/PSPC180254

光伏经多端柔性直流输电并网的控制研究

王磊¹, 武小龙¹, 侯俊贤², 王铁柱²

(1. 教育部光伏系统工程研究中心(合肥工业大学), 安徽 合肥 230009; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 为解决大规模光伏电站远距离输电问题, 采用光伏电站接入基于直流电压-有功功率-交流电压控制的多端柔性直流输电系统的并网方案。利用 Matlab/Simulink 仿真软件构建了一个包含两座光伏电站和一个无源网络的五端柔性直流输电系统模型, 并对该系统的运行特性进行了详细的仿真分析。仿真结果表明, 当光伏电站的输出功率发生波动时, 五端柔直系统传输的有功功率可实现自动平衡; 当电网发生三相短路故障时, 光伏电站依然能够稳定运行, 具有较好的故障穿越能力。

关键词: 光伏并网; 多端柔性直流输电; 故障穿越; 控制策略; 仿真分析

Control of photovoltaic power integration based on multi-terminal VSC HVDC system

WANG Lei¹, WU Xiaolong¹, HOU Junxian², WANG Tiezhu²

(1. Photovoltaic Research Center of MOE (Hefei University of Technology), Hefei 230009, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to solve the problem of long-distance transmission of large-scale photovoltaic power stations, a multi-terminal VSC HVDC system based on DC voltage-active power-AC voltage control strategy, which is connected with photovoltaic power stations, is designed in this paper. Using Matlab/Simulink, a five-terminal VSC HVDC model is constructed to verify the feasibility of the scheme. The model includes two photovoltaic power stations and a passive network. A series of simulations are carried out based on the model. The results show that the active power of the system can be automatically balanced when the output power of photovoltaic power stations changes. When the three-phase short circuit fault occurs in power grid, the photovoltaic power stations can still run in a stable state and have better ability of Fault Ride-Through (FRT).

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. XT71-15-066).

Key words: photovoltaic power integration; multi-terminal VSC HVDC; fault ride-through (FRT); control strategy; simulation analysis

0 引言

随着光伏发电成本大幅度降低, 我国西北地区大规模光伏电站迅速增多。目前, 大规模光伏电站一般采用特高压交流外送方式, 其优点是结构简单、技术成熟、可靠性高, 但由于当地负荷水平较低, 接入的地区电网短路容量相对较小, 光伏电站随机波动的有功出力会造成电网无功失衡, 进而导致沿途的母线电压大幅波动^[1-2]。柔性直流输电技术具有

可接入弱电网、可向无源负荷供电、能够采用有无功解耦控制、具备电网黑启动、动态响应快、谐波特性优良且占地面积小等诸多优点, 可实现太阳能等功率波动较大的新能源发电的大规模接入^[3-4]。根据结构的不同, 柔性直流输电可分为两端和多端系统。前者仅能实现点对点功率传输, 当一端换流站发生故障退出运行后, 直流系统将失去输电能力。而后者可实现多点供电、受电功能, 输电方式更加灵活、可靠, 能够实现不同地区的光伏电站与电网互联^[5]。目前, 国内针对风机经柔直并网的控制策略、运行特性和相关保护^[6-14]开展了大量研究, 而对光伏经柔直并网的研究较少, 随着我国光伏装机

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900600); 国家电网公司科技项目(XT71-15-066)

容量的不断增加, 研究光伏经柔直并网对大规模光伏电站并网具有重要意义。

本文利用 Matlab/Simulink 仿真软件搭建了一个含两个光伏电站和一个无源网络的五端并联型柔性直流输电系统模型。基于该模型进行的一系列仿真结果表明, 当光伏电站的输出功率发生波动时, 五端柔直系统传输的有功功率可实现自动平衡; 当电网发生三相短路故障时, 光伏电站依然能够稳定运行, 具有较好的故障穿越能力。

1 柔性直流输电的数学模型

柔性直流输电是一种基于电压源换流器(VSC)的直流输电技术^[15-16], 图1所示为柔性直流输电系统其中一端整流侧的结构, 因其他各端与整流侧的结构完全相同且相互独立, 故只分析一端即可。

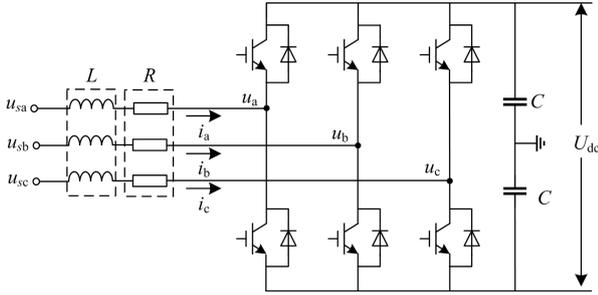


图1 柔性直流输电系统整流侧示意图

Fig. 1 Rectifier sketch chart of VSC-HVDC

图1中: u_{sk} 、 i_k 、 u_k ($k=a,b,c$)分别为电网电压、电网电流和VSC交流侧电压; U_{dc} 为VSC直流侧电压; R 、 L 分别为VSC等效电阻和换流电抗器; C 为VSC直流侧电容。由基尔霍夫定律可得

$$L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = -R \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_{sa} - u_a \\ u_{sb} - u_b \\ u_{sc} - u_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

假设交流系统三相平衡, 则有

$$\begin{pmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_s \cos \omega t \\ U_s \cos(\omega t - 120^\circ) \\ U_s \cos(\omega t + 120^\circ) \end{pmatrix} \quad (2)$$

若采用PWM调制, VSC交流侧电压为

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda m U_{dc} \cos(\omega t + \sigma) \\ \lambda m U_{dc} \cos(\omega t - 120^\circ + \sigma) \\ \lambda m U_{dc} \cos(\omega t + 120^\circ + \sigma) \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: λ 为直流电压利用率; m 为调制比; σ 为电网电压与VSC交流侧电压之间的相角。

将式(2)、式(3)代入式(1)可得在abc三相静止坐标系下的VSC数学模型。

$$L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = -R \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} U_s \cos \omega t \\ U_s \cos(\omega t - 120^\circ) \\ U_s \cos(\omega t + 120^\circ) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \lambda m U_{dc} \cos(\omega t + \sigma) \\ \lambda m U_{dc} \cos(\omega t - 120^\circ + \sigma) \\ \lambda m U_{dc} \cos(\omega t + 120^\circ + \sigma) \end{pmatrix} \quad (4)$$

将式(1)进行Park变换, 得到在 $d-q$ 同步旋转坐标下的VSC交流侧数学模型。Park变换矩阵 \mathbf{P} 及其逆矩阵 \mathbf{P}^{-1} 分别为

$$\mathbf{P} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{P}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

将式(5)和式(6)代入式(1), 可得 $d-q$ 同步旋转坐标下的VSC交流侧数学模型如下

$$L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -R & \omega L \\ -\omega L & -R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中: u_{sd} 、 u_{sq} 分别为电网电压 u_{sabc} 的 d 、 q 轴分量; u_d 、 u_q 分别为VSC交流侧电压 u_{abc} 的 d 、 q 轴分量。

2 柔性直流输电的控制策略

2.1 内环控制器设计

为方便分析可将式(7)改写为

$$\begin{cases} u_d = -L \frac{di_d}{dt} - Ri_d + \omega Li_q + u_{sd} \\ u_q = -L \frac{di_q}{dt} - Ri_q - \omega Li_d + u_{sq} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可以看出, 因 d 、 q 轴变量相互耦合, 给控制器的分析和设计带来不便。为此可采用前馈解耦控制策略^[17], u_d 、 u_q 的控制方程为

$$\begin{cases} u_d = -\left[K_p (i_{dref} - i_d) + K_i \int (i_{dref} - i_d) dt \right] + \omega Li_q + u_{sd} \\ u_q = -\left[K_p (i_{qref} - i_q) + K_i \int (i_{qref} - i_q) dt \right] - \omega Li_d + u_{sq} \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可得如图2所示的基于 $d-q$ 同步旋转坐标的内环解耦控制器。

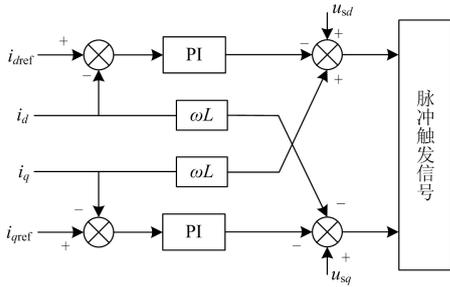


图 2 内环控制器

Fig. 2 Inner loop controller

2.2 外环控制器设计

外环控制器的作用是根据外部测量值计算内环电流参考值 i_{dref} 、 i_{qref} 。常见的柔性直流输电外环控制器有定直流电压控制器、PQ 控制器和 V/F 控制器^[18]。

1) 定直流电压控制器

柔性直流输电系统出现有功功率不平衡时, 直流电容发生充、放电, 导致直流电压波动, 功率差 ΔP 与直流线路电压变化率 ΔU 的关系如式(10)所示。

$$\Delta P = \left| \frac{3}{2} u_{sd} i_d - U_{dc} i_{dc} \right| = U_{dc} C \frac{\Delta U_{dc}}{\Delta t} \quad (10)$$

由式(10)可以看出, 可通过维持直流线路电压稳定平衡系统有功功率^[19]。定直流电压控制器如图 3 所示。

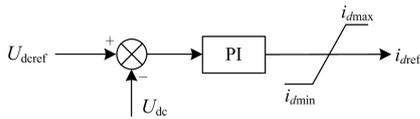


图 3 定直流电压控制器

Fig. 3 DC voltage controller

2) PQ 控制器

在 $d-q$ 同步旋转坐标系下, 当 d 轴以电网电压定向时, 电网向 VSC 输入的有功、无功功率为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} u_d i_d \\ Q = \frac{3}{2} u_d i_q \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知, 分别控制 i_d 、 i_q 即可独立调节有功、无功功率。由此可设计出 PQ 控制器, 如图 4 所示。

为方便分析系统有功功率的传输情况, 本文将采用 PQ 控制的换流器作为功率调节端, 而采用定直流电压控制的换流器在系统稳态时不参与有功调节, 仅起到稳定直流电压的作用。为使有功功率传输能够自动平衡, PQ 控制器的有功功率参考值 P_{ref} (p.u.)由式(12)确定。

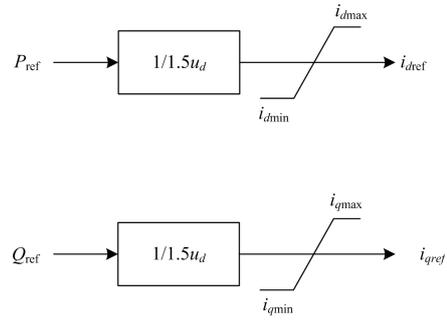


图 4 PQ 控制器

Fig. 4 PQ controller

$$P_{ref} = \frac{P_{pv1} + P_{pv2} - P_{load}}{P_n} \quad (12)$$

式中: P_{pv1} 、 P_{pv2} 分别为两个光伏电站的实时输出功率; P_{load} 为无源网络的实时吸收功率; P_n 为 VSC 的额定功率。

3) V/F 控制器

V/F 控制器能够将 VSC 交流侧电压幅值和频率维持在特定的范围内, 适用于柔性直流输电一端连接光伏电站或无源网络的场合^[20]。式(13)为 V/F 控制器表达式。

$$\begin{cases} i_{dref} = K_p (u_{sdref} - u_{sd}) + K_i \int (u_{sdref} - u_{sd}) dt \\ i_{qref} = K_p (u_{sqref} - u_{sq}) + K_i \int (u_{sqref} - u_{sq}) dt \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可设计出 V/F 控制器如图 5 所示。

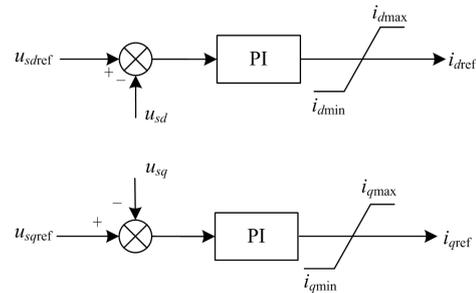


图 5 V/F 控制器

Fig. 5 V/F controller

3 光伏系统的控制策略

基于多端柔性直流输电电网的光伏系统采用定电压控制策略^[21-24], 将在当前光照强度、温度下 MPPT 输出的最大电压作为外环控制器的电压参考值, 其与光伏阵列实际输出电压的差值经 PI 调节后生成内环有功电流参考值 i_{dref} , 光伏系统以单位功率因数运行时无功电流参考值 $i_{qref} = 0$ 。控制系统如图 6 所示。

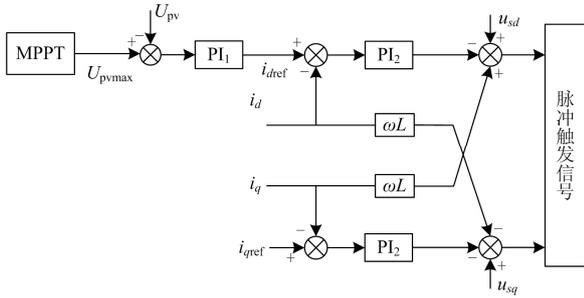


图 6 光伏控制系统

Fig. 6 PV control system

4 仿真分析

4.1 仿真系统说明

基于 Matlab/Simulink 仿真软件搭建了如图 7 所示的光伏接入五端并联型柔性直流输电系统模型。

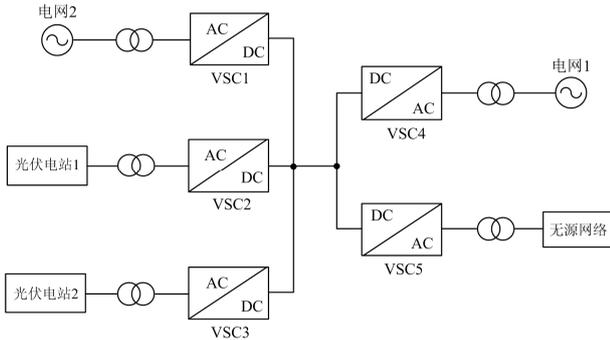


图 7 仿真系统结构

Fig. 7 Diagram of the simulation system

图中各端换流站交流侧额定电压均为 80 kV。VSC1、VSC4 与电网相连，其中，换流站 VSC1 额定功率为 50 MW，采用定直流电压控制以稳定直流线路电压，换流站 VSC4 额定功率为 80 MW，采用 PQ 控制以维持系统功率平衡；换流站 VSC2 和 VSC3 均与光伏电站相连，且都采用 V/F 控制以稳定光伏电站输出的交流电压，在光照强度 $S=1000 \text{ W/m}^2$ 、温度 $T=25^\circ\text{C}$ 的环境条件下，光伏电站 1 的输出功率为 20 MW，光伏电站 2 的输出功率为 30 MW；VSC5 与 10 MW 无源网络相连，同样采用 V/F 控制以稳定负荷侧交流电压。

4.2 光伏电站出力变化仿真分析

设置光伏电站 1 的初始光照强度值为 1000 W/m^2 ，光照强度在 1.5 s 时由 1000 W/m^2 开始下降，在 1.64 s 时降至 200 W/m^2 ，最后在 3.5 s 时由 200 W/m^2 开始上升，在 3.6 s 时升至 800 W/m^2 。

设置光伏电站 2 的初始光照强度值为 1000 W/m^2 ，光照强度在 1.0 s 时由 1000 W/m^2 开始

上升，在 1.05 s 时升至 1300 W/m^2 ，然后在 2.5 s 时由 1300 W/m^2 开始下降，在 2.67 s 时降至 300 W/m^2 ，最后在 4.0 s 时由 300 W/m^2 开始上升，在 4.12 s 时升至 1000 W/m^2 。

图 8 为光伏电站的输出功率发生波动时的直流电压的波形，图 9 为系统各端的仿真波形，图中 P_i 、 U_{abi} 、 f_i ($i=1,2,3,4,5$) 表示各换流站传输的有功功率、电压有效值和频率。

由图 8、图 9 可以看出直流电压能够快速达到稳定值，两个光伏电站的总输出功率的变化情况为：50-59-43-13-25-46 MW，电网 1 的有功功率吸收量相应做出调整：40-49-33-3-15-36 MW，而无源网络始终吸收 10 MW 的有功，故系统的功率传输保持平衡。在光伏电站输出功率发生波动期间，直流电压和各端的交流电压、频率没有较大波动，仿真结果表明光伏电站出力的波动对该柔性直流输电系统的稳定运行没有影响。

4.3 电网三相短路故障仿真分析

设置光伏电站 1、2 均运行在 $S=1000 \text{ W/m}^2$ 、 $T=25^\circ\text{C}$ 的环境条件下，即光伏电站 1 的输出功率为 20 MW，光伏电站 2 的输出功率为 30 MW。

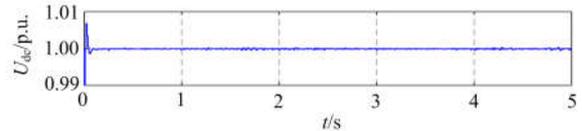
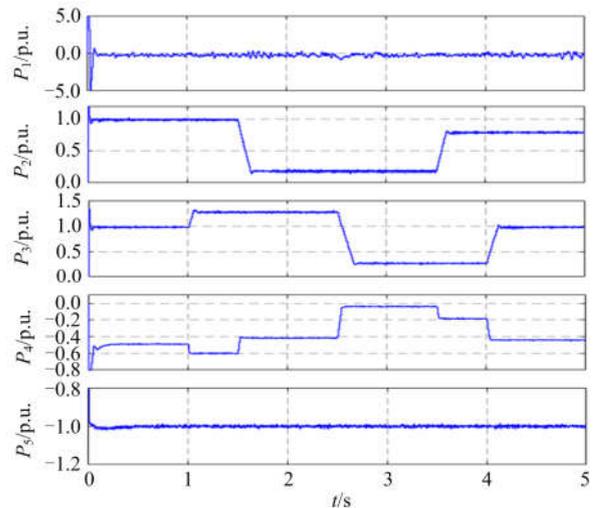
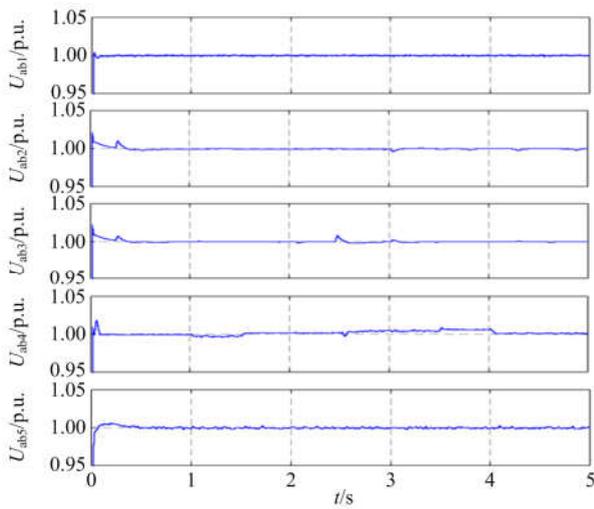


图 8 光伏电站的输出功率波动时直流电压波形

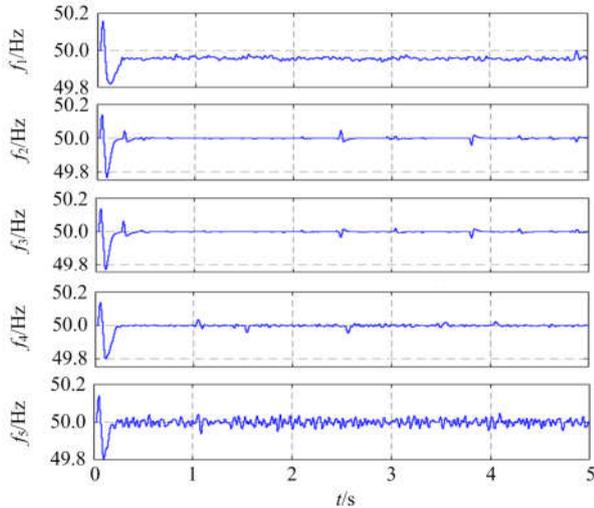
Fig. 8 DC voltage waveform when the photovoltaic power stations output change



(a) 各端有功功率波形



(b) 各端交流侧电压有效值波形



(c) 各端频率波形

图 9 光伏电站的输出功率波动时各端有功功率、交流电压和频率波形

Fig. 9 Power, AC voltage and frequency waveform of each terminal when the output of photovoltaic power stations changes

(1) 1.0 s 时设置电网 1 发生三相短路故障, 持续时间 0.1 s。图 10 为直流电压波形, 图 11 为系统各端的仿真波形, 图中 P_i 、 U_{abi} 、 f_i ($i=1,2,3,4,5$) 表示各 VSC 换流站传输的有功功率、电压有效值和频率。

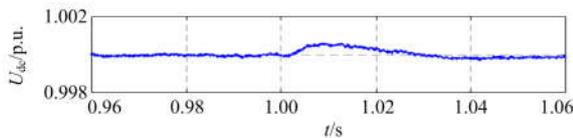
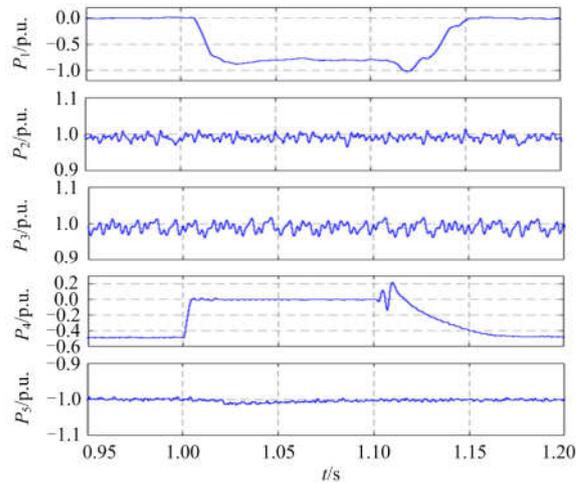
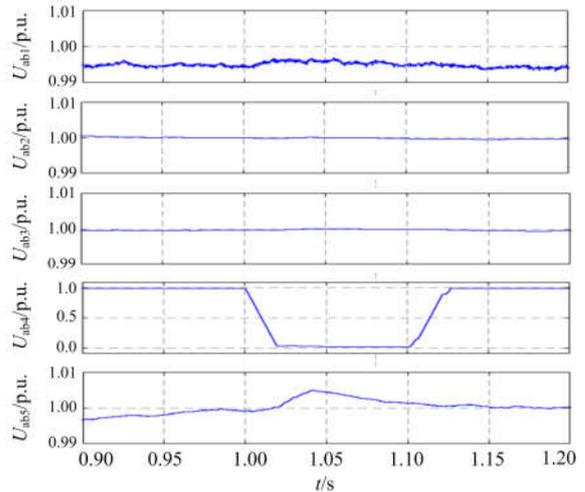


图 10 电网 1 发生三相短路故障时直流电压波形

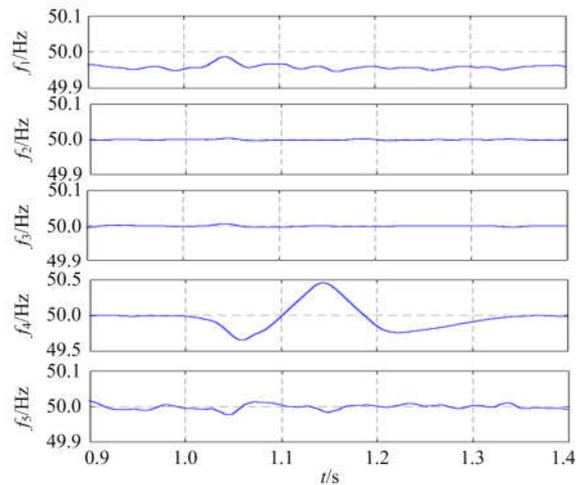
Fig. 10 DC voltage waveform when three-phase short circuit fault occurs in power grid 1



(a) 各端有功功率波形



(b) 各端交流侧电压有效值波形



(c) 各端频率波形

图 11 电网 1 发生三相短路故障时各端有功功率、交流电压和频率波形

Fig. 11 Power, AC voltage and frequency of each terminal when three-phase short circuit fault occurs in power grid 1

由图 10、图 11 可以看出, 电网 1 在 1.0 s 发生故障后电压迅速跌落至 0, 电网 1 吸收的有功功率由 40 MW 降为 0, 换流站 VSC4 不再参与有功调节。而此时电网 2 开始吸收有功, 吸收量由 0 增至 40 MW, 系统的传输功率仍保持平衡。直流线路电压 U_{dc} 几乎没有波动, 而 VSC4 端交流电压频率波动较大, 但仍处于正常范围内, 两个光伏电站几乎没有受到影响, 在故障前后的运行状态稳定。1.1 s 时故障清除, 系统在短时间内恢复正常运行。

(2) 1.0 s 时设置电网 2 发生三相短路故障, 持续时间 0.1 s。图 12 为直流电压波形, 图 13 为系统各端的仿真波形, 图中 P_i 、 U_{abi} 、 f_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$) 表示各 VSC 换流站传输的有功功率、电压有效值和频率。

由图 12、图 13 可以看出, 电网 2 在 1.0 s 发生故障后电压迅速跌落至 0, 并且仍然既不发出也不吸收有功, 而电网 1 保持吸收的有功功率值不变, 因此未造成系统功率失衡。相比于前一种故障, 由于起到控制直流电压作用的一端换流器所连接的电网发生三相短路, 直流电压 U_{dc} 出现下降趋势。VSC1 交流电压频率波动较大, 但对于光伏电站几乎没有影响。1.1 s 时故障清除, 此时换流站 VSC1 的传输功率出现巨大波动, 相应地直流电压也出现较大的波动, 0.1 s 后恢复正常。为防止出现此种过功率情况, 换流站应增添过流保护装置。

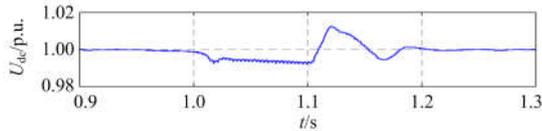
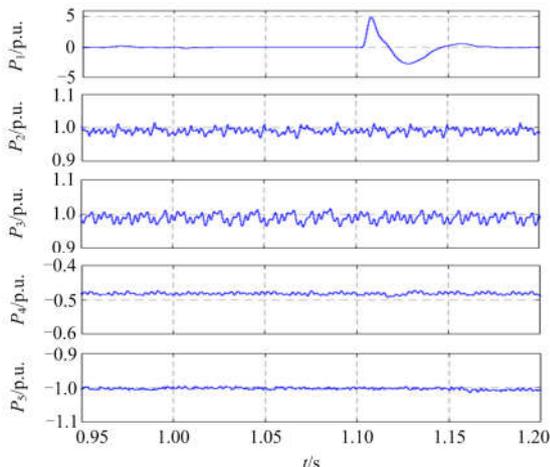
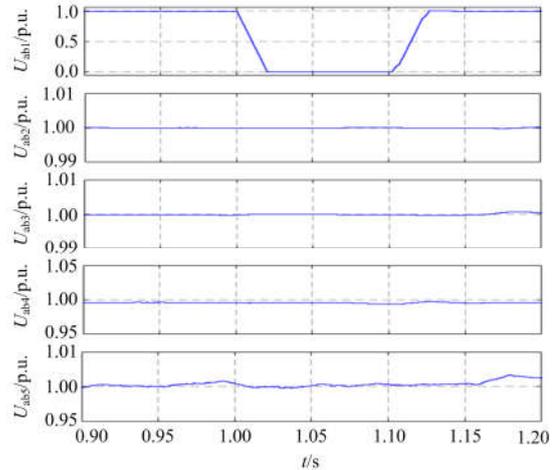


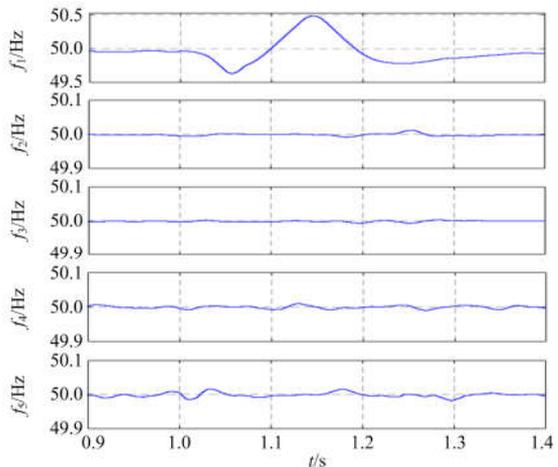
图 12 电网 2 发生三相短路故障时直流电压波形
Fig. 12 DC voltage waveform when three-phase short circuit fault occurs in power grid 2



(a) 各端有功功率波形



(b) 各端交流侧电压有效值波形



(c) 各端频率波形

图 13 电网 2 发生三相短路故障时各端有功功率、交流电压和频率波形

Fig. 13 Power, AC voltage and frequency of each terminal when three-phase short circuit fault occurs in power grid 2

5 结论

本文研究分析了连接多个光伏电站和无源网络的多端柔性直流输电系统的相关控制策略, 通过仿真得到以下结论:

(1) 与电网相连的换流器采用 PQ 控制可以起到主动调节柔直系统功率的作用, 保证了多个光伏电站并入多端柔直系统运行的稳定性, 当光伏电站出力波动时, 多端柔直系统几乎不受影响。

(2) 当电网发生三相短路故障时, 多端柔直系统可以保持功率平衡, 直流电压稳定, 并且光伏电站的运行几乎不受影响, 可以完成故障穿越, 可靠性较高。

多端柔性直流输电是解决大规模光伏电站远距

离并网输电问题的有效方法,该领域的研究对光伏发电行业的发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [2] 刘闯,汪兴浩,李江,等. 具有LVRT能力的光伏并网系统故障特性研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(2): 98-104.
LIU Chuang, WANG Xinghao, LI Jiang, et al. Research on fault characteristics of grid-connected photovoltaic system with LVRT capability[J]. Smart Power, 2018, 46(2): 98-104.
- [3] 王岩,魏林君,高峰,等. 光伏电站经柔性直流集电送出系统的低电压穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 70-78.
WANG Yan, WEI Linjun, GAO Feng, et al. Coordinated control strategy between large-scale photovoltaic power station and VSC-HVDC for low voltage ride-through operation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 70-78.
- [4] 付东,陈冰,张勇军. 柔性直流配电网的连接方式与建模综述[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 1-8.
FU Dong, CHEN Bing, ZHANG Yongjun. Review on connection mode and modeling of flexible DC power distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 1-8.
- [5] 李兴源,曾琦,王渝红,等. 柔性直流输电系统控制研究综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3025-3037.
LI Xingyuan, ZENG Qi, WANG Yuhong, et al. Control strategies of voltage source converter based direct current transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3025-3037.
- [6] 覃庆良,李梅航,于飞. 多端柔性直流输电系统中的低电压穿越问题[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(9): 91-96.
QIN Qingliang, LI Meihang, YU Fei. LVRT problems in multi-terminal VSC HVDC system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(9): 91-96.
- [7] 徐进,金逸,胡从川,等. 适用于海上风电并网的多端柔性直流系统自适应下垂控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 78-85.
XU Jin, JIN Yi, HU Congchuan, et al. DC voltage adaptive droop control of multi-terminal VSC-HVDC system for offshore wind farms integration [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 78-85.
- [8] DONG Huanfeng, XU Zheng, SONG Pengcheng, et al. Optimized power redistribution of offshore wind farms integrated VSC-MTDC transmissions after onshore converter outage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(11): 8948-8958.
- [9] 李琦,宋强,刘文华,等. 基于柔性直流输电的风电场并网故障穿越协调控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1739-1745.
LI Qi, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. A coordinated control strategy for fault ride-through of wind farm integration based on VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1739-1745.
- [10] 刘亚磊,李兴源,曾琦,等. 多端多电平柔性直流系统在海上风电场中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 9-14.
LIU Yalei, LI Xingyuan, ZENG Qi, et al. VSC-MTDC system based on MMC for offshore wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 9-14.
- [11] MENG Ke, ZHANG Wang, LI Yujun, et al. Hierarchical SCOPF considering wind energy integration through multiterminal VSC-HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4211-4221.
- [12] 洪敏,辛焕海,徐晨博,等. 海上风电与柔性直流输电系统的新型协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 53-58.
HONG Min, XING Huanhai, XU Chenbo, et al. Coordinated control strategy of offshore wind farms and VSC-based HVDC transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 53-58.
- [13] WANG Zhuodi, LI Kejun, REN Jingguo, et al. A coordination control strategy of voltage-source-converter-based MTDC for offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2015, 51(4): 2743-2752.
- [14] 范心明,管霖,夏成军,等. 风电场交直流混合输电并网中VSC-HVDC的控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4781-4790.
FAN Xinming, GUAN Lin, XIA Chengjun, et al. Control of VSC-HVDC in AC/DC hybrid transmission with wind farms integrated[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4781-4790.
- [15] 蒋冠前,李志勇,杨慧霞,等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.

- JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [16] 周仕豪, 王红星, 张健, 等. 柔性直流电子式电流互感器分流器建模方法与传变特性[J]. 广东电力, 2018, 31(2): 107-112.
ZHOU Shihao, WANG Hongxing, ZHANG Jian, et al. Modeling method and transmission characteristic of VSC-HVDC electronic current transformer shunt[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(2): 107-112.
- [17] 赵伟然, 李光辉, 何国庆, 等. 光伏电站经 VSC-HVDC 并网拓扑及其控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 41-45.
ZHAO Weiran, LI Guanghui, HE Guoqing, et al. Topology of connecting photovoltaic power station to power grid via VSC-HVDC and its control strategy[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 41-45.
- [18] 杨浩, 张楠, 叶明佳. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 离散模型及其控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 37-42.
YANG Hao, ZHANG Nan, YE Mingjia. Study of VSC-HVDC connected to passive network discrete model and its control strategies[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 37-42.
- [19] 陈鹤林, 徐政. 海上风电场柔性直流输电并网系统暂态特性研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(2): 430-439.
CHEN Helin, XU Zheng. Study on transient behavior of DC flexible on-grid transmission system offshore wind farm[J]. Acta Energetica Sinica, 2015, 36(2): 430-439.
- [20] 陈朋, 李梅航, 严兵, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的通用控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 47-52.
CHEN Peng, LI Meihang, YAN Bing, et al. General control strategy for VSC-based multi-terminal DC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 47-52.
- [21] 王久和, 穆小斌, 张百乐, 等. 光伏并网逆变器最大功率传输控制研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 49-56.
WANG Jiuhe, MU Xiaobin, ZHANG Baile, et al. Research on maximum power transfer control of photovoltaic grid connected inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 49-56.
- [22] 郑超, 林俊杰, 赵健, 等. 规模化光伏并网系统暂态功率特性及电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1059-1071.
ZHENG Chao, LIN Junjie, ZHAO Jian, et al. Transient power characteristic of scaled photovoltaic grid-connected system and its voltage control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1059-1071.
- [23] 高锋阳, 杜强, 乔垚, 等. 逆变器侧电流反馈的 LCL 型三相光伏并网逆变器解耦控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 122-128.
GAO Fengyang, DU Qiang, QIAO Yao, et al. Decoupling control strategy with inverter-side current feedback for LCL-type three-phase PV grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 122-128.
- [24] 原敬磊, 赵李宏, 李明, 等. 光伏发电系统功率输出控制模式研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(11): 91-95.
YUAN Jinglei, ZHAO Lihong, LI Ming, et al. Study on output power control mode of photovoltaic power generation system[J]. Smart Power, 2017, 45(11): 91-95.

收稿日期: 2018-03-10; 修回日期: 2018-04-27

作者简介:

王磊(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源发电变流技术、柔性输电系统仿真与控制; E-mail: wanglei223@hfut.edu.cn

武小龙(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为为柔性输电系统仿真与控制; E-mail: 841248578@qq.com

(编辑 张爱琴)