

DOI: 10.7667/PSPC161510

含电压源换流器的交直流混联电网无功优化模型

余秀月¹, 宋少群¹, 郭瑞鹏², 赵川³, 林洁⁴

(1. 国网福建电力调度控制中心, 福建 福州 350003; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027;
3. 云南电力调度控制中心, 云南 昆明 650011; 4. 广西电力调度控制中心, 广西 南宁 530023)

摘要: 随着厦门柔性直流输电工程的建成投运, 福建电网形成了以柔性直流输电通道与交流输电通道环网运行的交直流混联电网。为解决含柔性直流的交直流混联电网的无功优化控制问题, 提出了一个含电压源换流器的无功优化模型, 并采用分支定界法及原对偶内点法求解。所提模型及求解方法已在福建电网自动电压控制系统中进行了测试, 实现了对辖区范围内机组、容抗器、有载调压抽头和电压源换流器等各类无功电压调节策略的在线实时优化计算, 取得了较好的测试效果。

关键词: 电压源换流器; 交直流混联电网; 无功优化; 自动电压控制

Optimal reactive power flow model for AC/DC hybrid power grid with voltage source converters

YU Xiuyue¹, SONG Shaoqun¹, GUO Ruipeng², ZHAO Chuan³, LIN Jie⁴

(1. State Grid Fujian Electric Power Dispatch & Control Center, Fuzhou 350003, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Yunnan Electric Power Dispatch & Control Center, Kunming 650011, China; 4. Guangxi Electric Power Dispatch & Control Center, Nanning 530023, China)

Abstract: With the commissioning of Xiamen flexible HVDC transmission system, Fujian power grid has become an AC/DC hybrid power grid with voltage source converters. This paper presents an optimal reactive power flow model with voltage source converters, which is solved by branch and bound method and primal dual interior point method. The proposed model and related solving method have been tested on the automatic voltage control (AVC) system of Fujian power grid. The optimal control policies on generators, capacitors, reactors, OLTCs, and voltage source converters are calculated online, and the control performance is satisfactory.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377143).

Key words: voltage source converter; AC/DC hybrid power grid; reactive optimal power flow; automatic voltage control

0 引言

电力系统运行的基本目标是安全、优质和经济地向用户提供电能。电压质量是电能质量的重要指标, 对电力系统的安全与经济运行、保证用户安全生产和产品质量以及电器设备的安全与寿命有重要影响。过大的电压波动甚至可能引起电力系统电压崩溃, 形成大面积停电, 给电力系统和整个社会的政治经济造成重大影响。电力系统的无功补偿与无功平衡是保证电压质量的基本条件, 但相较于成熟的有功控制技术, 无功电压控制设备分散在各电压等级的电网中, 监控和操作均比较复杂, 另外无功

电压间的非线性程度较强, 优化控制和求解的难度较大。随着电网基础自动化水平的逐年提高及最优化技术的发展, 基于最优潮流(Optimal Power Flow, OPF)的无功优化控制得到了长足的发展。以无功优化为理论基础的自动电压控制(Automatic Voltage Control, AVC)系统在法国^[1]、意大利^[2]、西班牙^[3]、德国^[4-5]等国外电网和福建^[6]、江苏^[7]等国内电网相继投入运行, 取得了较好的效果。

福建电网于 2003 年在国内率先实现了省级电网 AVC 系统^[6], 并于 2006 年对 AVC 策略进行升级改造, 采用分支定界法及原对偶内点法求解无功优化问题, 大大提高了 AVC 策略的生成效率, 实现了对全网无功电压的闭环实时优化控制, 取得了较好的控制效果^[8]。

柔性直流输电技术采用电压源型换流器 (Voltage Source Converter, VSC), 具有有功无功独立调节、可向无源网络供电、可控性好和运行方式灵活的特点, 在电网互联、新能源并网以及向无源负荷供电等领域有着极其广泛的应用前景, 也为电网调度运行提供了灵活和高效的控制手段^[9-12]。随着全控型器件生产技术的不断成熟, 其制作成本逐渐降低, 器件容量及耐压能力显著提高, 基于 VSC 实现高压直流(High Voltage Direct Current, HVDC)输电的需求及应用呈现出上升态势。

目前对 VSC 的研究主要集中于其拓扑结构^[13-14]及控制保护策略^[15], 对含 VSC-HVDC 的交直流混联电网的分析方法的研究仍较少。文献[16]提出了基于模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 的 HVDC 系统的鲁棒故障诊断方法。文献[17]提出了改进的频率和持续时间法, 并用于柔性直流输电系统的可靠性评估。文献[18-19]研究了含 VSC-HVDC 系统的潮流计算方法。文献[20]基于模糊理论给出了含柔性直流输电的交直流并列系统多目标有功潮流优化方法。文献[21]将自动微分技术应用到了含 VSC-HVDC 的 OPF 计算中, 但自动微分技术的计算效率欠佳。文献[22]则比较了原对偶内点法与预测校正内点法求解含 VSC-HVDC 系统的最优潮流问题的性能。到目前为止仍未见对 VSC-HVDC 系统进行有功或无功电压实时优化控制的报道。

2015 年建成投运的福建厦门柔性直流输电系统采用 MMC, 直流额定电压为±320 kV, 输送容量 1000 MVA, 是世界上首个采用真双极接线的柔性直流输电工程, 电压等级和输送容量均为国际之最。厦门柔性直流输电系统与现有厦门地区 220 kV 交流电网环网运行, 构成了交直流混联电网。随着厦门柔性直流输电系统的建成投运, 有必要对福建电网已有 AVC 系统进行改造, 实现对包括柔性直流换流站在内的全网无功电压闭环实时优化控制, 充分利用电压源换流器的无功调节能力, 提高电网电压控制能力, 并降低网络损耗。

本文介绍了柔性直流输电系统的等值模型, 提出了含电压源换流器的交直流混联电网无功优化模型, 并采用分支定界法和原对偶内点法求解。所提模型及求解方法已在福建电网自动电压控制系统中进行了开环测试, 实现了对辖区范围内机组、容抗器、有载调压抽头和电压源换流器等各类无功电压调节策略的在线实时优化计算。待柔性直流输电系统测试稳定后即可投入闭环控制测试。

1 柔性直流输电系统模型

柔性直流输电系统主要由两部分组成: 电压源换流器和直流线路。

1.1 电压源换流器模型

电压源换流器是多端柔性直流输电系统的关键设备, 是直流系统与交流系统之间联系的纽带。各 VSC 一侧连接于直流网络, 另一侧连接于交流网络, 是直流网络与交流网络功率交换的桥梁。

文献[11]分析了 MMC 的损耗特性。借鉴其研究成果, 本文采用电阻及直流功率的线性函数来模拟 VSC 的损耗。

对于电网中的第 k 个 VSC, 记为 VSC_k , 相关物理量及其参考方向如图 1 所示, 即将实际电压源换流器等值为等值阻抗、可变电阻及理想电压源换流器 3 部分组成, 且可变电阻的有功损耗与换流器直流有功成线性关系。图中, R_k 和 X_k 分别表示等值内电阻及内电抗; P_{ak} 、 Q_{ak} 、 P_{dk} 和 L_k 分别表示交流有功、交流无功、直流有功和有功损耗系数; V_{ak} 和 θ_{ak} 分别表示交流侧的电压幅值和相位; V_{ck} 和 θ_{ck} 分别表示等值内电势的幅值和相位; V_{dk} 表示直流侧电压幅值。

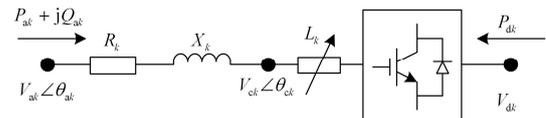


图 1 电压源换流器等值电路

Fig. 1 Equivalent electrical circuit for voltage source converter

记

$$g_k = R_k / \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$$

$$b_k = -X_k / \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$$

则有:

$$P_{ak} = V_{ak}^2 g_k - V_{ak} V_{ck} (g_k \cos \theta_{ck, ak} + b_k \sin \theta_{ck, ak}) \quad (1)$$

$$Q_{ak} = -V_{ak}^2 b_k + V_{ak} V_{ck} (g_k \sin \theta_{ck, ak} + b_k \cos \theta_{ck, ak}) \quad (2)$$

$$P_{dk} = V_{ak}^2 g_k - V_{ak} V_{ck} (g_k \cos \theta_{ck, ak} - b_k \sin \theta_{ck, ak}) + L_k |P_{dk}| \quad (3)$$

式中, $\theta_{ck, ak} = \theta_{ck} - \theta_{ak}$ 。

对于优化算法, 直接处理绝对值函数存在困难, 取

$$P_{dk} = P_{dk}^+ - P_{dk}^- \quad (4)$$

$$P_{dk}^+ \geq 0 \quad (5)$$

$$P_{dk}^- \geq 0 \quad (6)$$

$$P_{dk}^+ P_{dk}^- = 0 \quad (7)$$

则

$$|P_{dk}| = P_{dk}^+ + P_{dk}^- \quad (8)$$

将式(4)及式(8)代入式(3), 得

$$(1-L_k)P_{dk}^+ - (1+L_k)P_{dk}^- = V_{ak}^2 g_k - V_{ak}V_{ck}(g_k \cos \theta_{ck,ak} - b_k \sin \theta_{ck,ak}) \quad (9)$$

1.2 直线路路模型

对于电网中的第 k 条直流线路, 设其始端节点号为 i , 末端节点号为 j , 其等值电路、相关物理量及参考方向如图 2 所示。图中: V_{di} 及 V_{dj} 分别表示直流节点 i 及直流节点 j 的电压幅值; P_{ij} 及 P_{ji} 分别表示直流线路首末端的有功潮流。

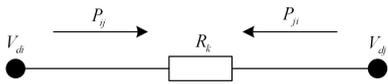


图 2 直流线路等值电路

Fig. 2 Equivalent electrical circuit for DC line

2 计及 VSC 的无功优化模型

状态量定义是电网无功优化模型的基础。对于交流节点, 取电压幅值及相位作为状态量; 对于直流节点, 取电压幅值作为状态量; 对于电压源换流器, 取等值电源内电势幅值及相位(即图 1 中的 V_{ck} 及 θ_{ck})作为状态量。

2.1 交流节点的有功及无功潮流平衡约束

$$\Delta P_{ai}^{inj} = P_{Gi} - P_{Li} - V_i^2 G_{ii} - \sum_{j \in N_a^i} V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - \sum_{k \in N_c^i} P_{ak} = 0 \quad (10)$$

$$\Delta Q_{ai}^{inj} = Q_{Gi} - Q_{Li} + V_i^2 B_{ii} - \sum_{j \in N_a^i} V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - \sum_{k \in N_c^i} Q_{ak} = 0 \quad (11)$$

式中: ΔP_{ai}^{inj} 及 ΔQ_{ai}^{inj} 分别表示节点 i 的有功及无功不平衡功率; P_{Gi} 及 Q_{Gi} 分别表示节点 i 的电源有功及无功功率; P_{Li} 及 Q_{Li} 分别表示节点 i 的负荷有功及无功功率; V_i 表示节点 i 的电压幅值; θ_{ij} 表示节点 i 与节点 j 之间的相位差, 即 $\theta_i - \theta_j$; G_{ij} 及 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵第 i 行第 j 列元素的实部及虚部; N_a^i 表示与节点 i 相邻的交流节点集; N_c^i 表示与节点 i 相邻的 VSC 编号集, 若节点 i 不是任一 VSC 的交流侧或直流侧节点, 则 N_c^i 为空集。

2.2 直流节点的有功潮流平衡约束

$$\Delta P_{di}^{inj} = V_{di}^2 G_{ii} + V_{di} \sum_{j \in N_d^i} V_{dj} G_{ij} + \sum_{k \in N_c^i} P_{dk} = 0 \quad (12)$$

式中: ΔP_{di}^{inj} 表示直流节点 i 的有功不平衡功率; G_{ij} 表示节点电导矩阵的第 i 行第 j 列元素; N_d^i 表示与直流节点 i 相邻的直流节点集。

2.3 交流电压相位参考值约束

对于交直流混联系统, 一个电气岛可能被直流系统划分为多个交流子系统, 对于每个交流子系统, 可以选择一个节点作为相位参考点

$$\theta_i = \theta_i^{set} \quad (13)$$

式中, θ_i^{set} 表示设定的参考点相位值。

2.4 直流电压参考值约束

对于交直流混联系统, 一个电气岛可能被交流系统分割为多个直流子系统, 对于每个直流子系统, 需选择一个直流节点作为定直流电压控制点,

$$V_i = V_i^{set} \quad (14)$$

式中, V_i^{set} 表示节点 i 的电压设定值。

实际电网中, 直流系统一般不考虑升压运行, 而降压运行将增加有功损耗, 故定直流电压控制点的电压目标值一般为额定电压附近。

2.5 VSC 双极对称运行约束

典型地, VSC 采用双极接线, 正常情况下为双极对称运行, 同一换流站内, 正负极 VSC 交流侧接于同一节点, 其等值电路如图 3 所示。

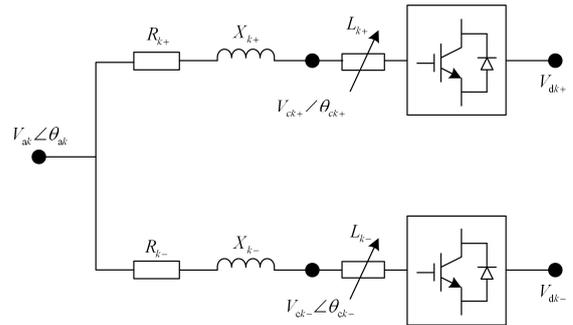


图 3 双极电压源换流器等值电路

Fig. 3 Equivalent electrical circuit for two-polar voltage source converter

VSC 双极运行时, 其两极之间的运行状态应是对称的, 故有:

$$\begin{cases} V_{ck+} = V_{ck-} \\ \theta_{ck+} = \theta_{ck-} \\ V_{dk+} = V_{dk-} \end{cases} \quad (15)$$

2.6 目标函数

对于无功优化问题, 一般以网络有功损耗最小为目标函数, 等价于各平衡机的有功出力之和最小, 即

$$\min \sum_{i \in S_N} P_{Gi} \quad (16)$$

式中, S_N 为交流节点的集合。

3 算例分析

由式(10)一式(16)描述的无功优化模型本质上是非线性混合整数优化问题, 可采用分支定界法结合原对偶内点法求解。该模型目前已经实际应用于福建 AVC 系统, 实现了对辖区范围内机组、容抗器、有载调压抽头和电压源换流器等各类无功电压调节策略的在线实时优化计算。

以福建电网 2016 年 8 月 15 日某实际运行断面为例, 电网的计算规模如表 1 所示。AVC 策略生成的总时间为 1.39 s, 系统在该时间内完成了数据读取、状态估计计算、无功优化计算和策略命令保存等工作, 其中无功优化计算所花费的时间仅为 0.25 s。目前福建电网 AVC 的控制周期为 5 min, 策略生成所花费的时间远小于 AVC 的控制周期, 能够很好地满足 AVC 对控制策略计算的实时性要求。

表 1 福建电网 2016 年 8 月 15 日计算规模

Table 1 Calculation scale of Fujian power grid in August 15, 2016

类型	数量
交流节点	550
交流支路	871
直流节点	2
直流线路	1
电压源换流器	2
发电机	114
可调抽头	10
可控容抗器	110

由于厦门柔性直流输电系统目前仍处于试运行阶段, 现场将换流站无功电压控制置于就地控制状态, 故主调 AVC 系统中换流站无功事实上不参与调节。为了说明换流站参与 AVC 的预期效果, 在备调 AVC 系统中将换流站 AVC 状态处理成远方控制并进行开环测试。以 2016 年 8 月 15 日为例, 图 4 和图 5 分别给出了鹭岛换流站和浦园换流站 220 kV 交流母线的电压曲线, 图 6 和图 7 分别给出了鹭岛换流站和浦园换流站 220 kV 并网点注入交流系统的无功功率曲线。

由图 4 及图 5 可以看出, 两座换流站 220 kV 母线的日电压波动幅度(日电压最大值减去最小值)均

小于 3.3 kV, 日电压波动率均小于 1.5%, 远小于国家电网公司要求的日电压波动率不超过额定电压 5% 的要求, 这说明了主调 AVC 系统的控制效果。比较图 4 的实际电压曲线及优化电压曲线可以看出, 鹭岛换流站 220 kV 交流母线的实际电压总体偏高, 优化结果以下调母线电压为主, 其中 0:00—6:00 和 20:00—24:00 等负荷低谷时段优化电压下调明显, 而在 10:00—11:00 及 14:00—16:00 等负荷高峰时段则上调或维持实际电压, 表现出了较为明显的逆调压特性。比较图 5 的实际电压曲线及优化电压曲线可以看出, 优化电压具有明显的逆调压特性。

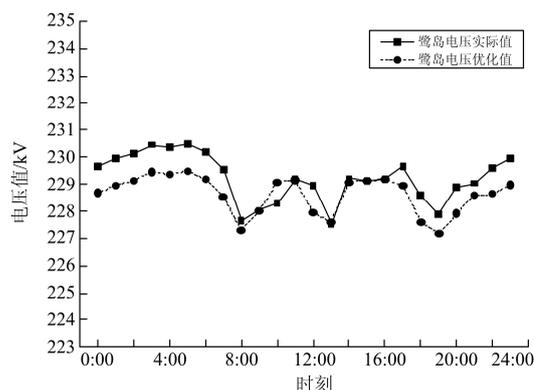


图 4 鹭岛换流站 220 kV 交流母线电压曲线

Fig. 4 Voltage curve of 220 kV AC bus in Ludao VSC-station

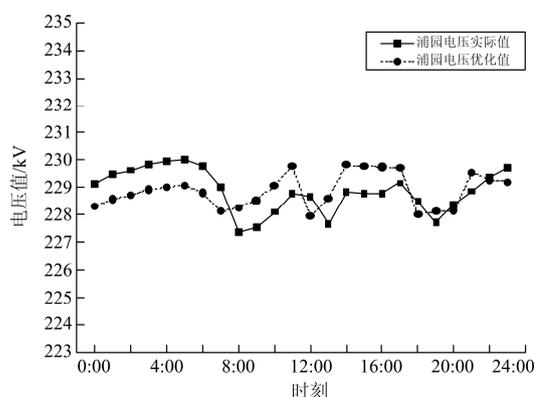


图 5 浦园换流站 220 kV 交流母线电压曲线

Fig. 5 Voltage curve of 220 kV AC bus in Puyuan VSC-station

由图 6 及图 7 可以看出, 两座换流站事实上都处于定并网点无功控制模式, 而优化无功曲线则与系统负荷曲线具有较强的相似性, 即负荷高峰时向交流系统多注入无功功率, 而负荷低谷时向交流系统少注入无功功率, 增强电网的电压控制能力, 并降低有功损耗。

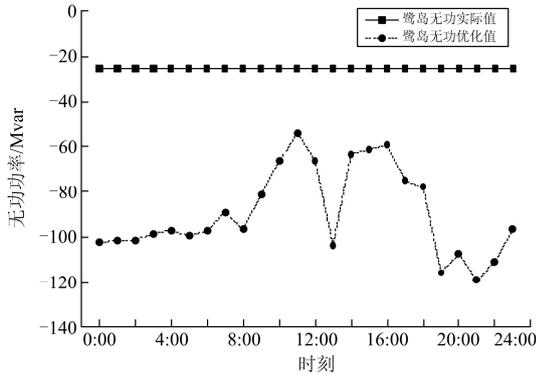


图 6 鹭岛换流站无功功率曲线

Fig. 6 Reactive power curve of Ludao VSC-station

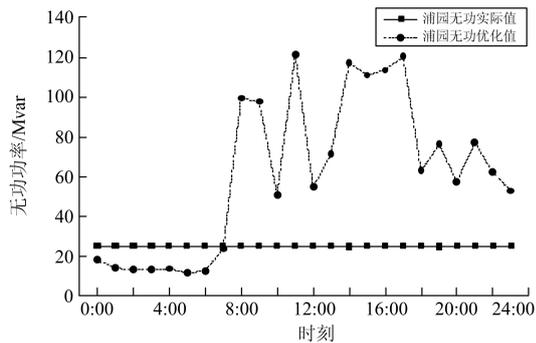


图 7 浦园换流站无功功率曲线

Fig. 7 Reactive power curve of Puyuan VSC-station

4 结论

厦门柔性直流输电系统是目前世界上电压等级最高、传输容量最大的柔性直流输电工程。随着厦门柔性直流输电系统的建成投运，福建电网形成了以柔性直流输电通道与交流输电通道并列运行的交直流混联电网。

本文提出了含柔性直流的交直流混联电网的无功优化模型，所提模型及求解方法已在福建电网自动电压控制系统中进行了开环测试，实现了对辖区内机组、容抗器、有载调压抽头和电压源换流器等各类无功电压调节策略的在线实时优化计算，取得了较好的效果，待柔性直流输电系统测试稳定后即可投入闭环控制测试。

参考文献

[1] LAGONOTTE P, SABONNADIÈRE J C, LEOST J Y, et al. Structural analysis of the electrical system: application to secondary voltage control in France[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(2): 479-486.

[2] CORSI S, MARANNINO P, LOSIGNORE N, et al. Coordination between the reactive power scheduling function and the hierarchical voltage control of the EHV

ENEL system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 686-694.

[3] SANCHAJ L, FERNANDEZ J L, CORTES A, et al. Secondary voltage control: analysis, solutions and simulation results for the Spanish transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 630-638.

[4] DENZEL D, EDWIN K W, GRAF F R, et al. Optimal power flow and its real time application at the RWE energy control center[C] // International Council on Large Electric systems(CIGRE), Paris, France, 1988: 9-19.

[5] GRAF F R. Real time application of an optimal power flow algorithm for reactive power allocation of the RWE energy control center[C] // International Practices in Reactive Power Control, IEE Colloquium on, London, April 7, 1993, 7: 1-4.

[6] 丁晓群, 邓勇, 黄伟, 等. 基于遗传算法的无功优化在福建电网的实用化改进[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 44-47.

DING Xiaoqun, DENG Yong, HUANG Wei, et al. Practical improvement of reactive power optimization based on genetic algorithm in Fujian power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 44-47.

[7] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 江苏电网 AVC 主站系统的研究和实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 83-87.

GUO Qinglai, SUN Hongbin, ZHANG Boming, et al. Research and development of AVC system for power networks of JIANGSU Province[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 83-87.

[8] GUO Ruipeng, CHIANG H D, WU Hao, et al. A two-level system-wide automatic voltage control system[C] // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, July 22-26, 2012: 1-6.

[9] 张桂斌, 徐政, 王广柱. 基于 VSC 的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 18-23.

ZHANG Guibin, XU Zheng, WANG Guangzhu. Steady-state model and its nonlinear control of VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 18-23.

[10] 邹超, 王奔, 李泰. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统控制策略[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 84-88.

ZOU Chao, WANG Ben, LI Tai. Control strategy of VSC-HVDC system supplying power for passive networks[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 84-88, 110.

[11] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

- [12] 杨用春, 赵成勇. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 控制性能实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 31-35.
YANG Yongchun, ZHAO Chengyong. Experimental study on control performance of VSC-HVDC connected to passive network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 31-35.
- [13] 胡鹏飞, 江道灼, 郭捷, 等. 基于混合型多电平换流器的柔性直流输电系统[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 33-38.
HU Pengfei, JIANG Daozhuo, GUO Jie, et al. VSC-HVDC system based on hybrid multilevel voltage sourced converters[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 33-38.
- [14] 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.
- [15] 付艳, 黄金海, 吴庆范, 等. 基于 MMC 多端柔性直流输电保护关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 133-139.
FU Yan, HUANG Jinhai, WU Qingfan, et al. Key technologies research based on multi-terminal MMC-HVDC protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 133-139.
- [16] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 7pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0022-0
- [17] 郭静丽, 王秀丽, 侯雨伸, 等. 基于改进 FD 法的柔性直流输电系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 8-13.
GUO Jingli, WANG Xiuli, HOU Yushen, et al. Reliability assessment of the VSC-HVDC transmission system based on a modified FD method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 8-13.
- [18] 郑超, 周孝信, 李若梅, 等. VSC-HVDC 稳态特性与潮流算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 4-8.
ZHENG Chao, ZHOU Xiaoxin, LI Ruomei, et al. Study on the steady characteristic and algorithm of power flow for VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 4-8.
- [19] 郑超. 实用柔性直流输电系统建模与仿真算法[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1058-1063.
ZHENG Chao. Study on practical modeling and simulation algorithm for VSC-HVDC power transmission[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1058-1063.
- [20] 邓健俊, 文安, 魏承志, 等. 含柔性直流输电的交直流并列系统有功潮流优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 118-123.
DENG Jianjun, WEN An, WEI Chengzhi, et al. An optimization method for active power flow in AC/VSC-HVDC parallel transmission systems[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 118-123.
- [21] 季聪, 卫志农, 汤涌, 等. 基于自动微分技术的 VSC-HVDC 内点法最优潮流[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 184-189.
JI Cong, WEI Zhinong, TANG Yong, et al. A primal-dual interior point method-based algorithm adopting automatic differentiation for optimal power flow of AC/DC power grid containing VSC-HVDC system[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 184-189.
- [22] 卫志农, 季聪, 孙国强, 等. 含 VSC-HVDC 的交直流系统内点法最优潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 89-95, 190.
WEI Zhinong, JI Cong, SUN Guoqiang, et al. Interior-point optimal power flow of AC-DC system with VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 89-95, 190.

收稿日期: 2016-09-12; 修回日期: 2016-11-18

作者简介:

余秀月(1978—), 女, 硕士, 高级工程师, 长期从事电力系统调度、运行方式管理等工作; E-mail: 16091726@qq.com

宋少群(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电网稳定运行管理工作; E-mail: blackducks@126.com

郭瑞鹏(1972—), 男, 通信作者, 博士, 副研究员, 长期从事电力系统状态估计、可靠性评估、最优化技术及其在电力系统中的应用等方面的研究工作。E-mail: eegrp@zju.edu.cn

(编辑 葛艳娜)