

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181141

计及 VSC 的交直流混联电网扩展规划研究

胥威汀, 欧阳雪彤, 苏运掣, 陶宇轩

(国网四川省经济技术研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 为解决交直流混联电网供电问题, 提出了计及 VSC(Voltage Source Converter)的交直流混联电网扩展规划模型与方法。首先分析了 VSC 元件稳态模型与典型控制策略, 在此基础上研究了计及 VSC 的交直流潮流计算方法。然后, 以发电运维成本最小化为目标, 提出了一种交直流混联电网扩展规划优化模型。通过算例验证了模型方法的可行性与有效性, 并展示了计算全过程。此外, 算例结果也表明差异化 VSC 元件控制策略会影响潮流分布水平, 进而影响最终扩展规划结果。

关键词: 交直流混联电网; VSC-HVDC; 交直流潮流计算; 规划

Expansion planning of AC/DC power grid with VSC

XU Weiting, OUYANG Xuetong, SU Yunche, TAO Yuxuan

(State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to solve the power supply problem of AC/DC hybrid system, an expansion planning model of AC/DC hybrid power grid with Voltage Source Converter (VSC) is proposed. Firstly, the steady-state model and typical control strategies of VSC components are analyzed. On this basis, the AC and DC power flow calculation method with VSC is studied. Then, aiming at minimizing the cost of generation operation and maintenance, an optimization model for expansion planning of AC/DC hybrid power system is proposed. The feasibility and effectiveness of the model method are verified by the examples, and the whole process of calculation is shown. In addition, the results also show that different VSC component control strategies will affect the power flow, and then affect the final expansion planning results.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGSCJY00GHJS1800026).

Key words: AC/DC hybrid grid; VSC-HVDC; AC/DC power flow calculation; planning

0 引言

随着化石能源的日益匮乏, 大力推动可再生能源的规模化使用成为了电网发展的新趋势。但由于可再生能源发电随机性、波动性的特征, 其接入电网会影响电网性能, 且比例越大影响越强^[1]。同时传统交流网络存在控制响应速度慢、调节精度低的问题, 清洁能源接入下频率偏移与电压波动更加频繁, 难以实现能源的高质量传输^[2-4]。相比传统交流输电, 直流输电的电压等级更高且不输送无功功率, 更适合可再生能源接入下的电能输送^[5]。我国目前

已经建设了大量的交流电网, 能完成近距离大功率的功率传输^[6]。通过交流电网和直流电网的互联, 能够实现电能更有效的输送, 因此很有必要对交直流电网进行规划。

交直流混联电网规划的基础在于交直流潮流计算。目前在交流潮流计算领域, 时下的潮流计算方法均基于牛顿法和 PQ 分解法进行改进, 使用一组非线性方程描述其潮流计算模型。也有文献研究交流潮流计算方法的直流近似, 文献[7]研究了计及无功与电压变化的直流潮流计算方法。在直流潮流计算领域, 由于直流网络不传输无功功率, 使用线性方程组即可描述其潮流计算模型。然而现有的研究大多集中于单一直流侧或是单一交流侧的潮流计算, 交直流混联系统潮流计算中仍存在很大的研究

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (SGSCJY00GHJS1800026)

空间。交直流系统的潮流计算方法按照不同的迭代求解方式可分为统一求解法和交替求解法两种。统一求解法在联立交流方程和直流方程后进行统一的迭代求解^[8-9], 交替求解法则分别迭代直流方程与交流方程并设置数据接口来交互计算结果^[10]。本文使用交替求解法进行交直流潮流计算, 交流系统与直流系统解耦迭代, 交替计算交直流混联系统中交流部分和直流部分的状态变量, 直至状态变量全都收敛为止^[11]。

换流器是交直流混联电网中的重要元件。传统直流输电技术以电流源型换流器为主, 而当前基于电压源型换流器的高压直流输电(Voltage Source Converter-High Voltage Direct Current, VSC-HVDC)技术由于能够将控制换流器的无功功率和有功功率解耦, 且在换流过程中产生谐波较少, 方便未来构建多端直流的电力系统^[12], 发展迅猛。目前国内外相关研究多集中在 VSC 设备本身的数学建模、控制策略和保护方法等方面, 很少涉及含 VSC-HVDC 的交直流电网潮流计算及其规划过程。早期基于 VSC-HVDC 的交直流电网潮流算法大多基于牛顿法^[13], 但该算法在实际计算时, 无法给出具体的直流侧电压和电流; 文献[14]推导出了—种 VSC-HVDC 系统的稳态潮流模型, 但该模型忽略了换流器的损耗; 文献[15]设计了一种基于等效注入功率法的含 VSC-HVDC 系统的交替迭代潮流计算方法, 但并未考虑具体运行中换流器的控制策略。控制策略的不同对换流器甚至交直流混合网络影响很大, 通过协调优化多回超、特高压直流输电系统的电压无功控制措施, 能够有效地降低整个交直流系统运行的损耗电量^[16]。因此, 在进行交直流电网扩展规划时, 讨论基于 VSC-HVDC 的交直流电网的潮流计算模型具有重要意义。

近年来随着清洁能源的不断接入, 直流电网与交流电网互联程度上升, 电网网架结构愈加复杂, 实际中对输电网扩展优化规划的技术需求也在增加。目前国内外专家学者针对单一交流侧或单一直流侧的扩展规划问题已有大量研究成果; 对交直流输电网的规划虽已有部分相关研究^[17-19], 但较前两者较少, 且已有研究极少考虑换流器控制策略。故而, 本文研究提出了一种计及 VSC-HVDC 控制策略的交直流混联电网扩展规划模型。

1 计及 VSC 的潮流计算

交直流混合电网潮流计算是扩展规划研究的基础。本文采用了一种考虑 VSC 元件的改进交替潮流计算方法, 在计算交流电网的潮流过程中, 将换

流器假定为预测的恒定注入功率, 在计算直流电网潮流时将交流电网视为恒定的注入功率, 最后通过交流电网和直流电网潮流计算的换流器数据结果, 判断交直流电网潮流计算是否正确。VSC 元件在迭代过程中作为迭代的耦合点, 在潮流计算中考虑其控制方式与损耗。具体计算步骤如图 1 所示。

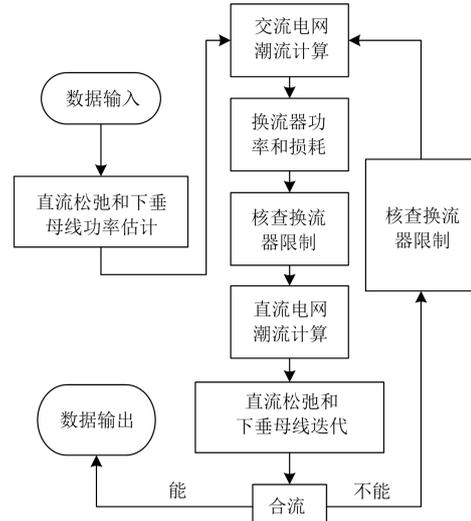


图 1 交直流潮流计算过程

Fig. 1 Calculation process of AC and DC power flow

1.1 VSC 元件模型与控制策略

VSC-HVDC 元件主要包括了互感器、滤波器、相位电抗器和换流器。在实际的运算中, 为了配合运算的过程, 对其进行简化, 简化电路模型如图 2 所示。

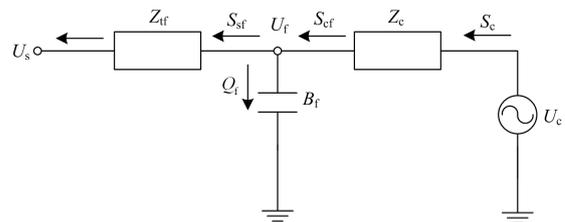


图 2 VSC-HVDC 模型

Fig. 2 VSC-HVDC model

该模型包括可控电压源 U_c 、复阻抗 Z_c 以及电容 B_f 。图 2 中 B_f 代表低通滤波器, 变压器将滤波器母线连接到交流电网, 等效为复阻抗 Z_{tf} 。在实际计算中, 变压器阻抗 Z_{tf} 和电感器电纳 B_f 可以选择性省略, 从而简化模型。在换流过程中, 换流器的损耗 P_{loss} 采用广义损耗式(1), 其值取决于换流器的电流 I_c 。

$$P_{loss} = a + bI_c + cI_c^2 \quad (1)$$

式中, a 、 b 和 c 为常数。

换流器控制策略考虑无功控制和有功控制两类, 包含恒功率控制、恒电压控制和电压功率下垂控制, 其功率-电压特性如图 3 所示。

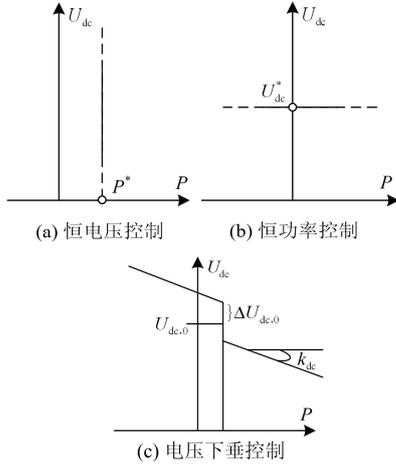


图 3 三种控制状态下换流器稳态运行特性

Fig. 3 Steady state operation characteristics of the converter under three control states

1.2 交流侧潮流计算

交流侧潮流计算基于牛顿法的极坐标形式。交流电网中, 换流器等效为输入到交流系统的恒定功率。换流器在恒电压控制下可看成虚拟的交流发电机, 此时如果模型中的交流节点没有连接电源, 则可在母线中添加一个虚拟发电机。若存在电源, 且该节点为 PQ 节点, 则将其转换为 PV 节点; 若交流节点为 PV 节点, 则需将换流器设置为恒定无功功率控制, 以避免无功紊乱。

计算交流侧潮流时, 换流器的有功注入和无功注入包括在为负的功率不匹配量 $\Delta P^{(k)}$ 、 $\Delta Q^{(k)}$ 中。此时, 功率不匹配量可以改写为

$$\Delta Q_i^{(j)} = Q_i^{\text{gen}} - (Q_i^{\text{dem}} - Q_{s_i}) - Q_i(U^{(j)}, \delta^{(j)}) \quad (2)$$

$$\Delta P_i^{(j)} = P_i^{\text{gen}} - (P_i^{\text{dem}} - P_{s_i}) - P_i(U^{(j)}, \delta^{(j)}) \quad (3)$$

在计算交流电网潮流后, 计算出所有换流器的功率和损耗, 获得直流电网的注入功率 P_{dc} (输出功率为 0 的直流母线忽略不计)为

$$P_{\text{dc}_i} = -P_{c_i} - P_{\text{loss}_i}, \quad \forall i < k \quad (4)$$

式中, P_{c_i} 为换流器侧功率注入的有功部分。根据图 2 中的模型来确定换流器的功率。

1.3 直流侧潮流计算

基于本次迭代中交流侧的功率注入值, 使用改进的牛顿法计算直流电网的潮流。恒功率控制下的换流器直流注入功率 P_{dc} 以交流潮流计算为前提。对于分布式电压控制下的换流器, 直流功率注入点

$P_{\text{dc},0}$ 是已知的。

直流松弛/下垂母线的交流侧有功功率注入 P_s 由直流功率 P_{dc} 与换流器损耗 P_{loss} 组成。由于换流器损耗取决于未知的换流器电流, 因此需要添加新的迭代来计算有功功率注入 P_s 。此时, $P_c^{(i)}$ 的值可表示为

$$P_c^{(i)} = -P_{\text{dc}}^{(k)} - P_{\text{loss}}^{(i)} \quad (5)$$

式中: 上标 i 和 k 分别表示直流松弛母线的迭代和外部交/直流潮流的迭代。交流网络潮流的计算结果为初始损耗 $P_{\text{loss}}^{(0)}$ 提供了初始估计。

以 U_c 和 U_f 作为变量的牛顿迭代主要用于更新换流器状态, 以此获得 $P_{\text{loss}}^{(0)}$ 的新值。使用在迭代期间假定为常数的 Q_s 的值和每次迭代后更新的 P_c 的值, 对每个直流松弛/下垂节点进行迭代。由滤波器母线的功率守恒可得 U_c 和 U_f 的两个方程, 联合求解即可完成直流侧的潮流计算, 在此不再赘述。

2 交直流电网扩展规划模型

以含 VSC 元件的潮流计算模型为基础, 可进一步建立交直流电网扩展规划模型。电网规划的目的在于满足电网输电能力的前提下, 使得电网的建设成本和运行成本最小, 以求达到最大的社会效益。本文扩展规划主要关注网络扩展, 考虑规划方案的经济性, 以最小化项目成本现值(Present Cost Value of the project, PCV)为目标, 计及了输电线路的建设、维护成本和发电机的发电成本。

2.1 目标函数

输电网扩展规划目标函数表达为

$$\min PCV = IC + RC + GC \quad (6)$$

$$GC = \sum_{i=1}^{I_{\text{ac}}} C_{G_i}^{\text{ac}} P_{G_i}^{\text{ac}} \quad (7)$$

$$IC = \sum_{i=1}^l C_{l_i} L_i + \sum_{i=1}^{I_{\text{ac}}} C_{G_i} P_{G_i} \quad (8)$$

式中: IC 为线路和发电机的安装成本; RC 为线路、换流器和发电机的年维护成本, 本文年维护成本简单估算为安装成本的 5%; GC 为发电机的发电成本; I_{ac} 为电网中交流发电机的数量; $C_{G_i}^{\text{ac}}$ 为交流发电机 i 的发电成本; $P_{G_i}^{\text{ac}}$ 为母线 i 处交流发电机的有功功率; C_{l_i} 为线路 i 的单位长度建设成本; L_i 为第 i 条新建线路长度; l 为扩建线路总数; C_{G_i} 为母线 i 处交流发电机的单位功率建设成本; P_{G_i} 为母线 i 处新建交流发电机的功率。

2.2 约束条件

1) 发电机出力约束

发电机的发电约束为

$$P_{G_i}^{\text{ac-min}} \leq P_{G_i}^{\text{ac}} \leq P_{G_i}^{\text{ac-max}}, \quad \forall i \in I_{\text{ac}} \quad (9)$$

$$P_{G_j}^{\text{dc-min}} \leq P_{G_j}^{\text{dc}} \leq P_{G_j}^{\text{dc-max}}, \quad \forall j \in J_{\text{dc}} \quad (10)$$

$$Q_{G_i}^{\text{ac-min}} \leq Q_{G_i}^{\text{ac}} \leq Q_{G_i}^{\text{ac-max}}, \quad \forall i \in I_{\text{ac}} \quad (11)$$

式中: $P_{G_i}^{\text{ac-min}}$ 为交流母线 i 处发电机的最大发电有功功率; $P_{G_i}^{\text{ac-max}}$ 为交流母线 i 处发电机的最小发电有功功率; $P_{G_j}^{\text{dc-min}}$ 为直流母线 j 处发电机的最小发电有功功率; $P_{G_j}^{\text{dc-max}}$ 为直流母线 j 处发电机的最大发电有功功率; $Q_{G_i}^{\text{ac-min}}$ 为交流母线 i 处发电机的最小发电无功功率; $Q_{G_i}^{\text{ac-max}}$ 为交流母线 i 处发电机的最大发电无功功率。

2) 功率平衡约束

扩展规划中每条母线的有功和无功功率平衡约束为

$$P_n^{\text{inj}} = P_n^{\text{cal}}, \quad \forall n \in N_b \quad (12)$$

$$Q_n^{\text{inj}} = Q_n^{\text{cal}}, \quad \forall n \in N_b \quad (13)$$

式中: P_n^{inj} 为注入母线 n 的有功功率; P_n^{cal} 为在母线 n 处计算的有功功率; Q_n^{inj} 注入母线 n 的无功功率; Q_n^{cal} 为在母线 n 处计算的无功功率。

3) 网络安全约束

网络安全约束包括每条母线的电压幅值约束和电压相角约束以及每条线路的容量约束, 分别为

$$V_n^{\text{min}} \leq V_n \leq V_n^{\text{max}}, \quad \forall n \in N_b \quad (14)$$

$$\theta_n^{\text{min}} \leq \theta_n \leq \theta_n^{\text{max}}, \quad \forall n \in N_b \quad (15)$$

$$0 \leq P_{nm} \leq P_{nm}^{\text{max}}, \quad \forall n \in N_b \quad (16)$$

式中: V_n^{min} 为母线 n 的最小电压幅值; V_n 为母线 n 的电压幅值; V_n^{max} 为母线 n 的最大电压幅值; θ_n^{min} 为母线 n 的最小电压相角; θ_n 为母线 n 的电压相角; θ_n^{max} 为母线 n 的最大电压相角; P_{nm} 为母线 n 和母线 m 之间传输的有功功率; P_{nm}^{max} 为母线 n 和母线 m 之间传输的最大有功功率。

4) 换流器电压约束

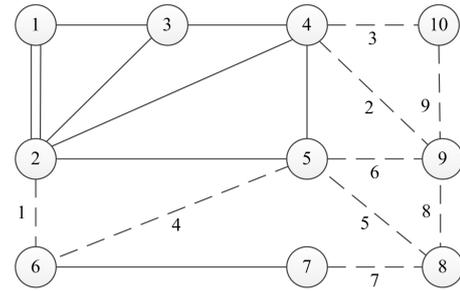
电网规划中换流器电压约束上下限可表示为

$$U_n^{\text{c-min}} \leq U_n^{\text{c}} \leq U_n^{\text{c-max}}, \quad \forall n \in N_b \quad (17)$$

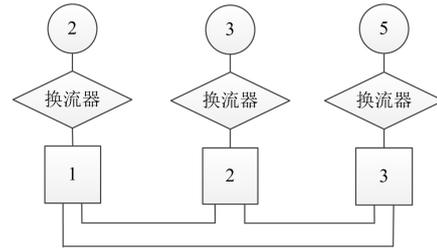
式中: $U_n^{\text{c-min}}$ 为最小换流器电压幅值; U_n^{c} 为换流器实际电压幅值; $U_n^{\text{c-max}}$ 为最大换流器电压幅值。

3 算例分析

测试系统交流部分采用 5 节点网络^[21]。考虑在未来的规划年限内, 电网将新增 5 个新的交流节点, 可扩建支路为 9 条, 可配置网络如图 4 所示, 其中实线代表原本存在和必须配置的线路, 虚线代表未配置的线路。直流部分采用 3 节点关联网^[21], 其中 1、2、3 节点通过 VSC 分别与交流网络的 2、3、5 号节点相连。相关网络参数如附录所示。



(a) 交流网络



(b) 直流网络

图 4 算例网络

Fig. 4 Network of node system

设备的年维护成本简化为线路建设成本的 5%, 5 节点算例中未给出的约束条件在附录中给出。

初始算例采用的 VSC 控制策略为: 连接直流母线 1 的换流器和连接直流母线 3 的换流器采用的是恒功率控制, 连接直流母线 2 的换流器采用的是恒双侧母线电压的控制方式。

对规划模型求解后, 满足规划模型约束条件的方案中, 以目标函数从小到大的方式进行排列, 其中前 5 个方案如表 1 所示。

表 1 满足规划模型的前五个方案

Table 1 First five schemes to satisfy the planning model

方案	扩建线路	(IC+IR)/万元	GC/万元	PCV/万元
1	1,2,3,4,6,7	700	46 678.548 45	47 378.548 45
2	1,2,3,6,7	595	46 789.470 61	47 384.470 61
3	1,2,3,5,6,7	682.5	46 711.335 77	47 393.835 77
4	1,3,6,7,9	525	46 883.052 14	47 408.052 14
5	1,2,3,4,6,7,9	752.5	46 659.922 36	47 412.422 36

通过对前 5 个方案进行对比可以得出：虽然发电成本在目标函数中所占的比例较大，但线路的建设成本和运行成本仍然对最后结果产生了决定性的影响。在设计电网时为了简化计算，除 1 号发电机外，其余机组都采用恒有功功率的控制，发电机 1 的有功输出变化并不明显，有功功率的变化量可以反映线路中的有功损耗。其中最优方案 1 的潮流分布如图 5 所示，次优的方案 2 的潮流如图 6 所示。

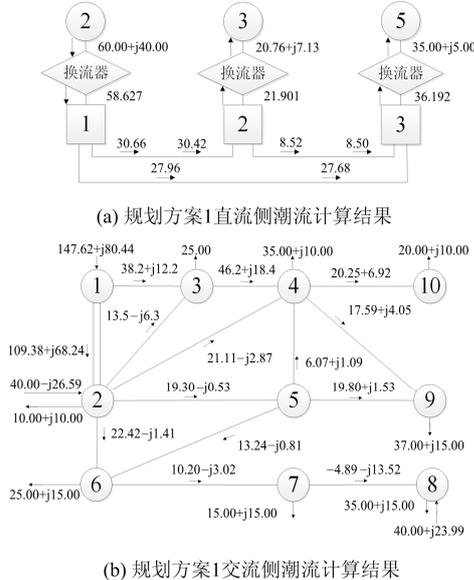


图 5 方案 1 最优解潮流计算结果

Fig. 5 Optimal power flow calculation results of Scheme I

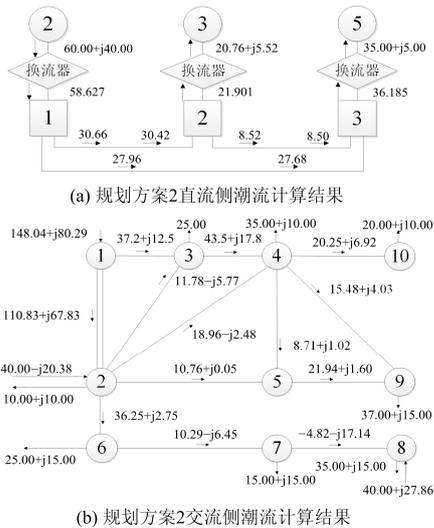


图 6 方案 2 次优解潮流计算结果

Fig. 6 Second-best solution power flow calculation results Scheme II

通过对图 5 和图 6 中的潮流进行对比可得，方案 1 虽然多建设了 5-6 这条线路，初期需要多投资

一条线路的成本，但由于其线路的阻抗较小，因此在电网运行的过程中能够有效减少线路中损失的有功功率，从而使得电网中发电机的有功出力减少，节省了发电成本。在规划期限内，由于其整体发电成本 GC 较低，最后的总成本 PCV 小于次优规划方案的总成本。在本算例中，发电成本的降低对规划结果造成了决定性的影响。

为了对比 VSC-HVDC 的不同控制策略对电网规划结果的影响，将换流器的控制策略都改为下垂控制策略，其参数见附录。根据改变后的电网参数进行电网的扩展规划，得到的规划结果按照目标函数进行排序，前 5 个规划结果如表 2 所示。

表 2 改变控制策略后规划结果的前 5 个方案

Table 2 First five schemes of planning result after changing control strategy

方案	扩建线路	(IC+IR)万元	GC/万元	PCV/万元
1	1,2,3,6,7	595	46 761.888 29	47 356.888 29
2	1,2,3,4,6,7	700	46 664.616 04	47 364.616 04
3	1,2,3,5,6,7	682.5	46 692.219 53	47 374.719 53
4	1,3,6,7,9	525	46 858.207 62	47 383.207 62
5	1,2,3,6,7,9	647.5	46 742.434 96	47 389.934 96

通过表 1 和表 2 的对比可以看出，由于 VSC-HVDC 的控制策略发生了改变，使得电网的扩展规划结果发生了变化。此时最优方案的潮流分布如图 7 所示。

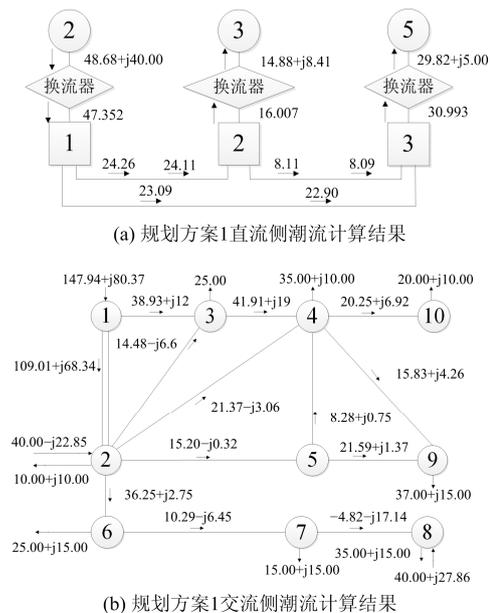


图 7 采用下垂控制的最优方案潮流分布

Fig. 7 Optimal solution of power flow calculation results with droop control

由于控制策略发生变化, 直流电网的功率传输减少, 交流电网的功率传输增大, 潮流的分布发生巨大改变。对比两次不同控制策略下的最优规划结果可以发现: 在使用前一种控制方案时, 扩建线路 5-6 虽然增大了建设成本, 但减少了线路损耗, 降低了发电成本, 使得整体成本较小; 在使用下垂控制方案后, 虽然扩建线路 5-6 仍能减少线路损耗, 但相比于前一种控制方案, 为了达到网络的稳态, 线路 5-6 所承担的功率传输较小, 减小的线路损耗有限, 在规划年内发电成本的降低不足以抵消多建线路 5-6 造成的输电线路成本增加。因此此时扩建线路 5-6 的方案成为了次优解, 输电线路建设成本成为规划结果的决定性因素。

由此可见, 不同的换流器控制策略会使网络潮流发生不同的变化, 并改变扩展规划的各项成本, 进而对目标函数的值产生影响。

4 结论

本文研究了考虑 VSC 元件的交直流潮流算法, 在此基础上提出了交直流混联电网扩展规划模型。通过算例仿真验证了模型的可行性与有效性, 并探讨了差异化换流器控制策略对交直流混联电网规划的影响。

附录

附表 1 可规划网络节点参数

Attached Table 1 Node parameters of planning network

交流母线序号	节点类型	有功负载/MW	无功负载/Mvar
6	1	25	15
7	1	15	15
8	1	35	15
9	1	37	15
10	1	20	10

附表 2 可规划网络支路参数

Attached Table 2 Line parameters of planning network

交流来端 母线序号	交流去端 母线序号	电阻/ p.u	电抗/ p.u	母线充电 电纳/p.u	线路容 量/MVA	线路长 度/km
6	7	0.08	0.24	0.05	100	80
2	6	0.07	0.21	0.09	100	70
4	9	0.04	0.12	0.07	100	80
4	10	0.05	0.15	0.04	100	60
5	6	0.06	0.18	0.07	100	50
5	8	0.02	0.6	0.07	100	40
5	9	0.06	0.18	0.04	100	70
7	8	0.07	0.21	0.05	100	60
8	9	0.04	0.12	0.04	100	30
9	10	0.08	0.24	0.07	100	80

附表 3 下垂控制策略参数

Attached Table 3 Droop control policy parameters

直流节点	k	$P_{dc,0}$	$U_{dc,0}$	$\Delta U_{dc,0}$
1	0.005	-50	1	0.005
2	0.007	20	1	0.005
3	0.005	35	1	0.005

参考文献

- [1] ABRA V, PALIWAL K, SHARMA P, KUMAR N, et al. Optimization of photovoltaic power system: a comparative study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 29-39. DOI: 10.1186/s41601-017-0036-2.
- [2] 张东霞, 姚良忠, 马文媛. 中外智能电网发展战略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 1-14. ZHANG Dongxia, YAO Liangzhong, MA Wenyuan. Development strategies of smart grid in China and abroad[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 31(31): 2-14.
- [3] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12. WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.
- [4] 刘振亚, 张启平, 董存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513-2522. LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [5] 饶宏, 黄莹, 黎小林, 等. ± 800 kV 特高压直流输电标准体系及主设备标准的探讨[J]. 南方电网技术, 2010, 4(增刊 1): 167-170. RAO Hong, HUANG Ying, LI Xiaolin, et al. Investigation of ± 800 kV UHVDC transmission standard system and the standards for main equipments[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(S1): 167-170.
- [6] 周浩, 钟一俊. 特高压交、直流输电的适用场合及其技术比较[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(5): 6-12. ZHOU Hao, ZHONG Yijun. Applicable occasions of UHVAC/UHVDC transmission and their technology comparisons in China[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 6-12.
- [7] 刘盾盾, 程浩忠, 方斯顿, 等. 计及电压与无功功率的直流潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 58-62. LIU Dundun, CHENG Haozhong, FANG Sidun, et al. DC power flow calculation method considering voltage

- and reactive power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 58-62.
- [8] ARRILLAGA J, BODGER P. Integration of HVDC links with fast-decoupled load-flow solutions[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 2010, 124(5): 463-468.
- [9] LI Canbing, XIAO Liwu, CAO Yijia, et al. Optimal allocation of multi-type FACTS devices in power systems based on power flow entropy[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2014, 2(2): 173-180.
- [10] BARADAR M, GHANDHARI M, HERTEM D V. The modeling multi-terminal VSC-HVDC in power flow calculation using unified methodology[C] // IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, December 5-7, 2011, Manchester, UK: 1-6.
- [11] 王振浩, 由作宇, 黄亚磊, 等. 基于连续潮流法的含双端 VSC-HVDC 交直流系统负荷裕度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 9-15.
WANG Zhenhao, YOU Zuoyu, HUANG Yalei, et al. Load margin analysis of hybrid AC/DC system with two terminal VSC-HVDC using continuous power flow method[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 9-15.
- [12] 孟垂懿, 鲍洁秋, 武录. VSC-HVDC 输电系统特点与应用[J]. 科技信息, 2011(30): 143-147.
MENG Chuiyi, BAO Jieqiu, WU Lu, et al. Characteristics and application of VSC-HVDC transmission system[J]. Scientific and Technological Information, 2011(30): 143-147.
- [13] ANGELES-CAMACHO C, TORTELLI O L, ACHAE, et al. Inclusion of a high voltage DC-voltage source converter model in a Newton-Raphson power flow algorithm[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(6): 691-696.
- [14] 吕鹏飞. 轻型高压直流输电系统数字仿真及其控制方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2002.
LÜ Pengfei. Research on digital simulation to HVDC light system and its control strategy[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2002.
- [15] 陈谦, 唐国庆, 王浔. 多端 VSC—HVDC 系统交直流潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(6): 1-6.
CHEN Qian, TANG Guoqing, WANG Xun. AC-DC power flow algorithm for multi-terminal VSC-HVDC systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(6): 1-6.
- [16] 李兴, 杨智斌, 颜远, 等. 考虑换流站损耗特性的交直流系统多目标无功优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 119-125.
- LI Xing, YANG Zhibin, YAN Yuan, et al. Multi-objective reactive power optimal control of AC-DC systems including power loss characteristics of converter stations[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 119-125.
- [17] 洪绍云, 程浩忠, 曾平良, 等. 输电网扩展优化规划研究综述[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3102-3107.
HONG Shaoyun, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. Overview of transmission network expansion optimization planning[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3102-3107.
- [18] ZHANG S, CHENG H, WANG D, et al. Distributed generation planning in active distribution network considering demand side management and network reconfiguration[J]. Applied Energy, 2018, 228: 1921-1936.
- [19] 程浩忠, 李隽, 吴耀武, 等. 考虑高比例可再生能源的交直流输电网规划挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 19-27.
CHENG Haozhong, LI Jun, WU Yaowu, et al. Challenges and prospects for AC/DC transmission expansion planning considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 19-27.
- [20] 吴素农, 于金镒, 田庄, 等. 基于扩展节点法的交直流混合电网统一潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 40-47.
WU Sunong, YU Jinyi, TIAN Zhuang, et al. A unified power flow algorithm for AC/DC hybrid networks using modified augmented nodal analysis[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 40-47.
- [21] BEERTEN J, BELMANS R, et al. Development of an open source power flow software for high voltage direct current grids and hybrid AC/DC systems: MATA CDC[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(10): 955-974.

收稿日期: 2018-09-05; 修回日期: 2018-11-07

作者简介:

胥威汀(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电网规划、能源战略和电力市场; E-mail: XWT14122@163.com

欧阳雪彤(1992—), 女, 本科, 中级工程师, 研究方向为电网规划及电力市场;

苏韵掣(1992—), 男, 硕士, 研究方向为电网规划与可靠性评估。

(编辑 许威)