

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191115

基于电压源换流器的多端柔性直流输电系统拟交流最优潮流

张爽¹, 李宏强¹, 王峰², 牛琳琳²

(1. 国网宁夏电力公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750002; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要: 为便于求解含多端柔性直流输电系统的最优潮流, 提出一种拟交流最优潮流计算方法。通过分析电压源换流器的工作原理, 建立了计及换流站有功损耗的交流电源型等值电路。针对系统直流网络部分设定约束条件, 将其等效为特殊的交流网络。为降低计算复杂度, 对换流站的能量耦合方程进行了线性化处理。基于此, 含多端柔性直流系统可视为纯交流系统并进行潮流计算。考虑到交流系统最优潮流问题具有非凸特性, 将其最优潮流模型松弛为半定规划模型。实验结果表明, 所述方法能够有效求解多端柔性直流系统最优潮流问题。

关键词: 多端直流; 最优潮流; 拟交流; 换流站有功损耗; 半定规划

Quasi-AC optimal power flow for voltage source converter-based multi-terminal DC system

ZHANG Shuang¹, LI Hongqiang¹, WANG Feng², NIU Linlin²

(1. State Grid Ningxia Electric Power Research Institute, Yinchuan 750002, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: A quasi-AC Optimal Power Flow (OPF) solution is proposed to solve the OPF problem of a Voltage Source Converter-based Multi-Terminal DC (VSC-MTDC) system. By analyzing the principle of the VSC, an equivalent model considering the loss of the VSC station is established with AC power supply. Constraints are added to the DC grid to equate it to the special AC grid. The energy coupling equation of the VSC is linearized to simplify the difficulty. Based on the above, the power flow of a VSC-MTDC system can be calculated as an AC system. Since the OPF problem of an AC system is non-convex, the OPF model is relaxed to a semi-definite programming model. The test result shows that the proposed method can solve the OPF problem of a VSC-MTDC system.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904503) and Scientific and Technological Project of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd. (No. JA29DK190001).

Key words: multi-terminal DC; optimal power flow; quasi-AC; loss of VSC; semi-definite programming

0 引言

近年来, 柔性直流输电技术在向多端化和网络化的方向发展^[1-3], 相比于传统点对点输送功率的两端直流, 基于电压源换流器的多端柔性直流系统 (Voltage Source Converter Based Multi-terminal DC, VSC-MTDC) 在实现多点供电、多点受电方面具有显著优势, 同时潮流调控更为灵活可靠^[4-6]。

最优潮流 (Optimal Power Flow, OPF) 是研究电力系统调度策略、运行优化控制的基础, 具有重要的理论价值和实际意义^[7-9]。不同于纯交流电网,

VSC-MTDC 系统的 OPF 问题不仅要考虑系统节点约束条件, 还要计及换流站的约束^[10-13], 故针对交流系统 OPF 问题的求解方法无法直接应用于 VSC-MTDC 系统。

目前, 国内外学者针对 VSC-MTDC 系统的 OPF 问题进行了研究。文献[14]采用预测-校正内点法求解了含 VSC-HVDC 系统 OPF 问题。文献[15]提出了一种适用于 VSC-MTDC 系统 OPF 的交直流网络联合求解方法。文献[16-17]基于分布式算法对交直流电网的 OPF 问题进行分区域求解。文献[18]提出一种考虑换流器精确损耗与电压下垂控制的交直流系统 OPF 计算方法。文献[19]通过对厦门柔性直流工程的无功功率特性进行分析, 提出了计及柔性直流损耗的交直流无功优化模型。文献[20]对考虑换

基金项目: 国家重点研发计划项目资助 (2018YFB0904503); 国网宁夏电力有限公司科技项目资助 (JA29DK190001)

流站损耗的交直流电网的 OPF 问题进行了研究。文献[21]将二阶锥规划应用于含有源滤波器交直流电网的 OPF 问题。

然而, 所述文献[14-15]的方法需对传统交流 OPF 算法代码进行大幅修改。文献[16-17]采用了不精确的 VSC 损耗计算式, 当系统中换流站较多时, 可能导致规划出现偏差。文献[18-21]直接在 OPF 模型中引入了 VSC 损耗式, 使得变量矩阵规模庞大, 造成求解困难。文献[22]将换流站等效为复合变压器, 并将 VSC-MTDC 系统中直流网络模拟为交流网络, 最后采用牛顿拉夫逊法统一求解交直流混合网络的潮流, 取得了良好的效果。本文借鉴文献[22]中拟交流(Quasi Alternating Current, QAC)等效思想, 提出一种针对 VSC-MTDC 系统的 OPF 问题的简便求解方法。

本文根据电压源换流器的运行特性, 提出一种含 VSC-MTDC 系统的 QAC 等效模型; 通过设定约束条件, 将系统直流网络视为交流网络; 线性化换流站交直流侧的电压与有功约束方程, 使其易于嵌入 OPF 模型中。为保证全局最优解, 建立系统 OPF 问题的半定规划(Semi-Definite Programming, SDP)模型^[23]。最后, 在改进的 IEEE30 测试系统中论证所述方法的有效性。

1 多端柔性直流电网潮流模型

VSC-MTDC 系统可看作由直流网络, 交流网络及换流站组成, 如图 1 所示。由于 VSC-MTDC 系统换流站控制方式派生组合较多^[22], 而本文研究侧

重于系统 OPF 的简便求解方法, 故不涉及换流站特定控制模式的分析。

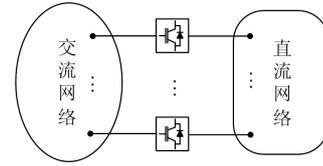


图 1 VSC-MTDC 系统示意图
Fig. 1 Diagram of VSC-MTDC

1.1 VSC 换流站等效电路

VSC 换流站 i 的一般电路如图 2 所示。图中, $U_{si} \angle \delta_{si}$ 为换流站 i 交流侧网络公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)的电压; $U_{ci} \angle \delta_{ci}$ 为换流站在交流侧节点的交流电压; U_{dci} 为换流站直流侧节点的直流电压; S_{si} 为换流站注入 PCC 的功率; S_{sfi} 为滤波器节点流向 PCC 的功率; S_{cfi} 为由换流站注入滤波器节点的功率; P_{ci} 与 Q_{ci} 为换流站注入交流侧的有功与无功功率; P_{dci} 为换流站注入到直流侧网络的有功功率; I_{ci} 为换流站流入交流侧网络的电流幅值; I_{dci} 为换流站注入到直流侧网络的电流值; Z_{tfi} 为变压器的阻抗; B_{fi} 为滤波器电纳; Z_{ci} 为电阻器阻抗。

稳态运行时, 换流站在交流侧可等效为受控交流电压源, 在直流侧可等效为受控直流电压源, 如图 3 所示^[21]。由于 VSC 等效电路无法体现换流站对系统的影响, 因此建立系统的 OPF 模型需包含如下换流站能量耦合约束。

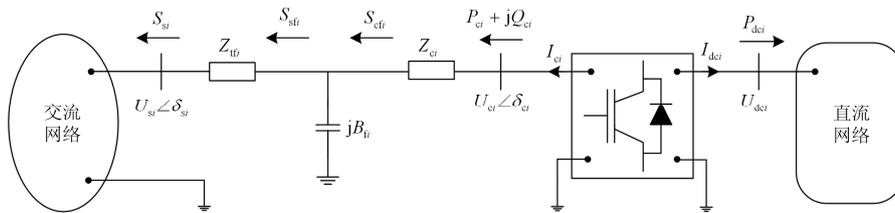


图 2 VSC 换流站示意图

Fig. 2 Diagram of VSC station

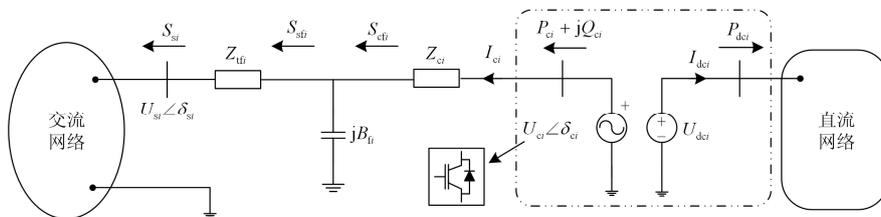


图 3 VSC 换流站 AC/DC 等效电路

Fig. 3 AC/DC equivalent circuit of VSC station

$$U_{ci} = \frac{1}{\sqrt{2}} \mu M_i U_{dci} \quad (1)$$

$$P_{ci} + P_{dci} + P_{loss,i} = 0 \quad (2)$$

式中: μ 为脉宽调制的电压利用率; M_i 为电压调制比; $P_{loss,i}$ 为换流站 i 的有功损耗, 具体表示为换流站交流侧端口电流的二次函数^[18]。

$$P_{loss,i} = a_i + b_i I_{ci} + c_i I_{ci}^2 \quad (3)$$

式中, a_i 、 b_i 、 c_i 为换流器的损耗特性参数, 需要通过电磁暂态仿真的曲线拟合得到。

1.2 交直流系统 QAC 潮流模型

为将成熟的交流系统 OPF 求解方法应用于

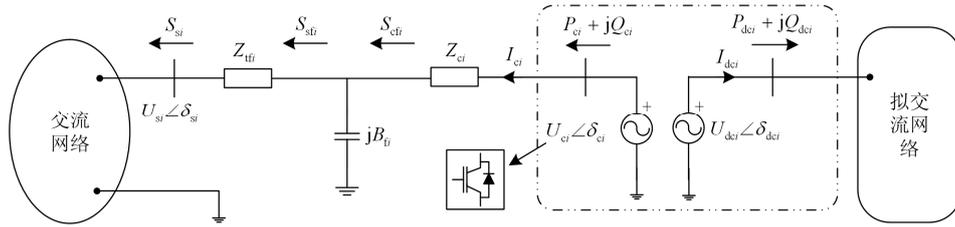


图4 VSC 换流站 QAC 等值电路

Fig. 4 Quasi-AC equivalent circuit of VSC station

1.3 换流站约束条件线性化

考虑直流网络电压通常维持在基准值附近, 则可假定 $U_{dci} = 1$ p.u., 则有

$$U_{ci} = \frac{1}{\sqrt{2}} \mu M_i \quad (4)$$

而 M_i 需满足以下约束

$$0 \leq M_i \leq M_i^{\max} \quad (5)$$

式中, M_i^{\max} 为电压调制比上限。

则结合上述式子, 式(1)可转化为

$$0 \leq U_{ci} \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \mu M_i^{\max} \quad (6)$$

式(6)可视为 OPF 模型中节点电压幅值约束, 可不再计及换流站电压约束。

为线性化换流站有功损耗约束, 首先定义一个新的函数 $f_i(x)$, 其表达式为

$$f_i(x) = I_{ci}^2(x) = x \quad (7)$$

则式(3)可改写为

$$P_{loss,i} = a_i + b_i \sqrt{f_i(x)} + c_i f_i(x) \quad (8)$$

在任意满足系统安全运行点 x_0 处对 $\sqrt{f_i(x)}$ 进行泰勒展开, 并忽略掉 2 次项以上得:

$$\sqrt{f_i(x)} \approx \sqrt{f_i(x_0)} + \left(\frac{1}{2\sqrt{f_i(x_0)}} \right) (x - x_0) \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)后, 换流站损耗计算如式(10)所示。

$$P_{loss,i} = \left(a_i + b_i \frac{I_{ci}(x_0)}{2} \right) + \left(c_i + \frac{b_i}{2I_{ci}(x_0)} \right) I_{ci}^2 \quad (10)$$

在图 4 的换流站拟交流侧并联一个电阻 R_{dci}^{loss} , 并重新设置电阻器阻抗为 Z'_{ci} , 如图 5 所示。

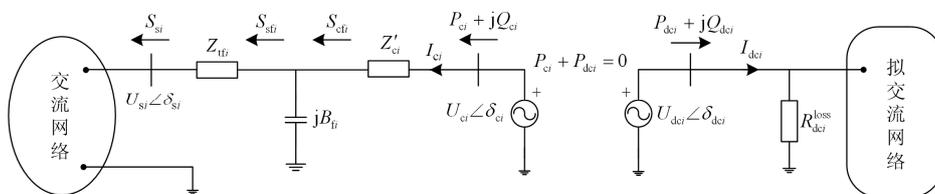


图5 VSC-MTDC 系统 QAC 等值电路

Fig. 5 Quasi-AC equivalent circuit of VSC-MTDC system

其中, 设定 $R_{\text{dci}}^{\text{loss}}$ 与 Z'_{dci} 的值如下:

$$R_{\text{dci}}^{\text{loss}} = 1 / \left(a_i + b_i \frac{I_{\text{ci}}(x_0)}{2} \right) \quad (11)$$

$$Z'_{\text{ci}} = Z_{\text{ci}} + \left(c_i + \frac{b_i}{2I_{\text{ci}}(x_0)} \right) \quad (12)$$

先前假定了 $U_{\text{dci}} = 1 \text{ p.u.}$, 故根据式(10), 换流站有功损耗 $p_{\text{loss},i}$ 中常量部分可视为 $R_{\text{dci}}^{\text{loss}}$ 上的热耗; $p_{\text{loss},i}$ 中与 I_{ci}^2 成正比的变量部分则被转化为 Z'_{ci} 的部分热耗。于是, 式(2)的换流站有功平衡约束式可采用式(13)代替:

$$P_{\text{ci}} + P_{\text{dci}} = 0 \quad (13)$$

2 QAC-OPF 模型

本节首先给出交直流电网 QAC-OPF 的非线性规划模型, 再将其转化为 SDP 形式。

2.1 QAC-OPF 的模型

选取直角坐标系, 以系统总发电成本最小的目标函数^[24]。

$$\min \sum_{i \in N_g} (a_{g,i} + b_{g,i} P_{G,i} + c_{g,i} P_{G,i}^2) \quad (14)$$

式中: N_g 为发电机编号集合; $P_{G,i}$ 为与节点 i 相连的发电机发出的有功; $a_{g,i}$ 、 $b_{g,i}$ 、 $c_{g,i}$ 为发电机的煤耗特性曲线参数。

1) 等式约束, 包含式(13)及节点功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{G,i} - P_{D,i} = U_{\text{di}} \sum_{j \in N} (G_{ij} U_{\text{dj}} - B_{ij} U_{\text{qj}}) - \\ \quad U_{\text{qi}} \sum_{j \in N} (G_{ij} U_{\text{qj}} + B_{ij} U_{\text{dj}}) \quad \forall i \in N \\ Q_{G,i} - Q_{D,i} = U_{\text{di}} \sum_{j \in N} (G_{ij} U_{\text{qj}} + B_{ij} U_{\text{dj}}) - \\ \quad U_{\text{qi}} \sum_{j \in N} (G_{ij} U_{\text{dj}} - B_{ij} U_{\text{qj}}) \quad \forall i \in N \end{cases} \quad (15)$$

式中: N 为交直流系统节点编号集合; $Q_{G,i}$ 为与节点 i 相连的发电机发出的无功; $P_{D,i}$ 、 $Q_{D,i}$ 为节点 i 的有功与无功负荷; U_{di} 、 U_{qi} 为节点 i 电压的实部与虚部; $G_{ij} + B_{ij} \times i$ 为交直流系统节点导纳矩阵 Y 的元素。

2) 不等式约束为系统安全运行约束

$$\begin{cases} P_{G,i}^{\min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{\max} \quad \forall i \in N_g \\ Q_{G,i}^{\min} \leq Q_{G,i} \leq Q_{G,i}^{\max} \quad \forall i \in N_g \\ (U_i^{\min})^2 \leq U_{\text{di}}^2 + U_{\text{qi}}^2 \leq (U_i^{\max})^2 \quad \forall i \in N \\ 0 \leq P_{ij} \leq P_{ij}^{\max} \quad \forall i, j \in N \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{G,i}^{\min}$ 、 $P_{G,i}^{\max}$ 为与节点 i 相连发电机有功出力的

上、下限; $Q_{G,i}^{\min}$ 、 $Q_{G,i}^{\max}$ 为与节点 i 相连发电机无功出力的上、限; U_i^{\min} 、 U_i^{\max} 为节点 i 的电压幅值的上、下限; P_{ij} 、 P_{ij}^{\max} 分别为线路 i 、 j 输送的有功及其上限。

2.2 QAC-OPF 的 SDP 模型

为建立最优潮流的 SDP 模型, 首先定义如下变量和矩阵^[23]。

$$M_i = \begin{bmatrix} e_i e_i^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & e_i e_i^T \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$u = [U_{\text{d}}, U_{\text{q}}] \quad (18)$$

$$V = u^T u \quad (19)$$

$$Y_i = e_i e_i^T Y \quad (20)$$

$$W_i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \text{Re}\{Y_i + Y_i^T\} & \text{Im}\{Y_i - Y_i^T\} \\ \text{Im}\{Y_i - Y_i^T\} & \text{Re}\{Y_i + Y_i^T\} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\bar{W}_i = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} \text{Im}\{Y_i + Y_i^T\} & \text{Re}\{Y_i - Y_i^T\} \\ \text{Re}\{Y_i - Y_i^T\} & \text{Im}\{Y_i + Y_i^T\} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$W_{ij} = (\bar{y}_{ij} + y_{ij}) e_i e_i^T - (y_{ij}) e_i e_j^T \quad (23)$$

式中: U_{d} 、 U_{q} 分别表示 U_{di} 、 U_{qi} ($\forall i \in N$) 的相量; e_i 为第 i 个元素为 1 的单位列相量; y_{ij} 为线路 i 、 j 的串联导纳; \bar{y}_{ij} 为并联导纳; W_i 、 \bar{W}_i 、 W_{ij} 均为系数矩阵, 用于建立 SDP 模型。

利用上述公式可得系统 OPF 的 SDP 模型。

$$\min \sum_{i \in N_g} \left\{ a_{g,i} + b_{g,i} [\text{Tr}(W_i V) + P_{D,i}] + c_{g,i} [\text{Tr}(W_i V) + P_{D,i}]^2 \right\} \quad (24)$$

$$P_{G,i}^{\min} - P_{D,i} \leq \text{Tr}\{W_i V\} \leq P_{G,i}^{\max} - P_{D,i} \quad (25)$$

$$Q_{G,i}^{\min} - Q_{D,i} \leq \text{Tr}\{\bar{W}_i V\} \leq Q_{G,i}^{\max} - Q_{D,i} \quad (26)$$

$$(U_i^{\min})^2 \leq \text{Tr}\{M_i V\} \leq (U_i^{\max})^2 \quad (27)$$

$$0 \leq \text{Tr}\{W_{ij} V\} \leq P_{ij}^{\max} \quad (28)$$

$$\text{rank}\{V\} = 1 \quad (29)$$

$$0 = \text{Tr}\{(W_{\text{ci}} + W_{\text{dci}}) V\} \quad (30)$$

式中: $\text{Tr}\{\bullet\}$ 表示矩阵的迹, 式(30)为式(13)的半定矩阵迹运算形式; W_{ci} 、 W_{dci} 表示换流站 i 交、直流侧的节点的 W_i 矩阵。松弛掉模型中式(29)的等约束可得凸的 OPF 模型^[25]。

3 算例分析

3.1 测试系统及其参数

本文基于改进的 IEEE30 节点系统进行实验分

析, 系统拓扑图可见文献[21]。改进的 IEEE30 节点系统基准容量为 100 MVA, 节点电压上、下限分别设置为 1.10 p.u. 与 0.90 p.u., 线路输送有功功率的上限为 80 MW。算例中对各换流站均设置相同参数, 其参数如表 1 所示。表中, S_i 为换流站 i 的容量; $U_{dc,Base}$ 为直流网络的电压基准值; $R_{dc,ij}$ 为直流线路 i 、 j 的电阻。

表 1 换流站参数

Table 1 Parameters of VSC station

名称	参数值
S_i	100 MVA
$U_{dc,base}$	320 kV
M_i^{max}	1.00
μ	0.84
Z_{if}	0.00+j0.20 p.u.
Z_{ci}	0.00+j0.10 p.u.
B_{fi}	0.008 p.u.
a_i	2×10^{-3}
b_i	8×10^{-3}
c_i	6×10^{-3}
$R_{dc,ij}$	0.005 p.u.

3.2 QAC 模型有效性验证

为验证所提 QAC-OPF 模型的有效性, 设置如下对比实验:

- 1) 采用原对偶内点法^[14]求解 QAC-OPF 模型。
- 2) 采用文献[21]的方法求解 AC/DC-OPF 模型

(基于图 3 所示等值电路建立的 OPF 模型)。

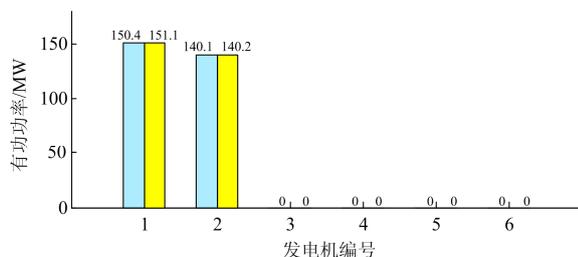
需要说明的是, 文献[21]中未采用式(3)所示换流站有功损耗计算式, 而是采用 $P_{loss,i} = \beta_i P_{ci}$ 近似求解损耗, β_i 为有功损耗比, 在算例中取 0.01。

QAC-OPF 模型与 AC/DC-OPF 模型求解得的系统最小发电费用如表 2 所示, 发电机最优出力如图 6 所示。

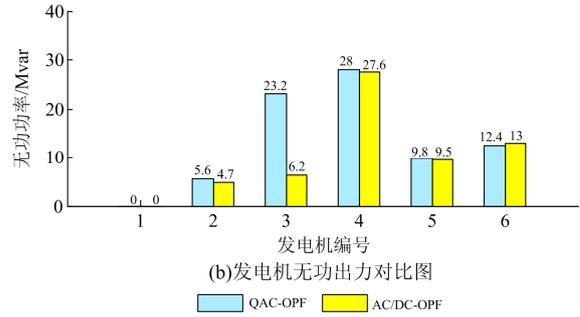
表 2 最优潮流结果对比

Table 2 Comparison of OPF results

	QAC-OPF	AC/DC-OPF
系统发电费用(\$/h)	5 802.80	5 822.08



(a) 发电机有功出力对比图



(b) 发电机无功出力对比图

图 6 发电机出力对比图

Fig. 6 Generator output contrast diagram

从表 2 的求解结果可以看出, 两个模型最优发电费用偏差在 0.5% 以内, 同时图 6 中最优潮流下所得各发电机有功出力基本一致, 说明了本文所提 QAC-OPF 模型的可行性。对比系统发电机无功出力可以发现, QAC-OPF 模型中发电机 2 无功出力远大于 AC/DC-OPF 模型, 两者差值达 17 Mvar, 而两模型中其他发电机最大无功偏差仅 0.9 Mvar, 造成该结果的原因在于两个模型中换流站损耗的计算式的差别。

本文的 QAC-OPF 模型虽对换流器有功损耗式进行了简化, 但其依然为 I_{ci} 的二次计算式。而 AC/DC-OPF 模型中换流站损耗仅与注入交流侧的有功有关, 当发电机与换流站接入相同母线时, 换流站与发电机的无功出力会相互补偿, 即使发电机无功出力发生变化, 系统各发电机有功出力以及各换流站损耗值不会变化。

为进一步说明, 给出两个模型结果中换流站在交流侧的出力表(表 3)、QAC-OPF 模型的换流站有功损耗计算结果(表 4)以及 AC/DC-OPF 模型的换流站有功损耗计算结果(表 5)。其中, 为保持对比实验结果的一致性, 表 3 的 QAC-OPF 模型结果换流站有功出力包含了 $P_{loss,i}$ 。

根据上述表中的 QAC-OPF 与 AC/DC-OPF 模型计算结果, 换流站在交流侧的有功出力以及换内部有功损耗均基本一致。两个模型的结果偏差主要为换流站在交流侧的无功出力。其中, 与发电机 3

表 3 VSC 在交流侧有功与无功出力

Table 3 Active/reactive power injection at AC side of VSC

换流站	QAC-OPF		AC/DC-OPF	
	P_{ci} /MW	Q_{ci} /Mvar	P_{ci} /MW	Q_{ci} /Mvar
1	-79.56	17.43	-79.96	17.31
2	23.38	1.63	25.74	2.68
3	54.83	8.34	52.53	26.89
4	-58.83	1.71	-59.91	17.45
5	40.92	12.98	40.44	10.07
6	16.77	0.98	18.45	3.49

表 4 QAC-OPF 换流站有功损耗

Table 4 Loss of VSC obtained by QAC-OPF

换流站	$P_{\text{loss},i} / \text{MW}$	换流站	$P_{\text{loss},i} / \text{MW}$
1	0.51	4	0.42
2	0.28	5	0.35
3	0.40	6	0.25

表 5 AC/DC-OPF 换流站有功损耗

Table 5 Loss of VSC obtained by AC/DC-OPF

换流站	$P_{\text{loss},i} / \text{MW}$	换流站	$P_{\text{loss},i} / \text{MW}$
1	0.79	4	0.59
2	0.25	5	0.40
3	0.52	6	0.18

相连的 VSC3 的无功出力在两个模型中的差值达 18.56 Mvar。若忽略换流站中变压器损耗所引起的偏差, 该偏差值可看作两模型中发电机 3 无功出力差额, 表明 AC/DC-OPF 模型的计算结果中换流站 VSC3 补偿了发电机 3 的无功出力, 这与之前的分析相吻合。

4 结语

本文建立了 VSC 换流站的 QAC 等值电路, 并基于此提出了适用于 VSC-MTDC 系统的 QAC-OPF 模型。经改进的 IEEE30 节点系统的实验分析, 得到如下结论:

1) 本文所提的方法能有效解决含 VSC-MTDC 系统的最优潮流问题, 所建立的 QAC-OPF 模型计算所得目标函数最优值与传统方法结果基本一致, 其偏差值在 0.5% 以内, 能满足工程实际要求。

2) QAC-OPF 模型能够精确求解换流站的内部有功损耗, 且避免了在模型中引入过多的约束条件。

参考文献

- [1] JIANG Binkai, WANG Zhixin. Average-value modeling and control strategy of VSC-MTDC[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(3): 1-8.
- [2] 郑舒, 赵景涛, 谭阔, 等. 计及柔性直流装置的交直流配电网保护控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 132-136.
ZHENG Shu, ZHAO Jingtao, TAN Kuo, et al. Research on protection and control of AC/DC distribution network considering DC flexible device[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 132-136.
- [3] 马河涛, 黄守道, 饶宏, 等. 基于马尔可夫过程的柔性直流输电系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 10-16.
MA Hetao, HUANG Shoudao, RAO Hong, et al. Reliability analysis of VSC-HVDC system based on Markov process[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 10-16.
- [4] 赵晓斌, 邵冰冰, 韩民晓. 基于 N-1 规则的多端柔性直流输电系统联合控制策略[J]. 电力建设, 2017, 38(11): 19-25.
ZHAO Xiaobin, SHAO Bingbing, HAN Mingxiao. Coordinated control strategy for VSC-MTDC systems based on N-1 criterion[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(11): 19-25.
- [5] 邓旗, 张英敏, 曾琦, 等. 一种 VSC-MTDC 系统的综合协调控制策略[J]. 电力建设, 2017, 38(8): 59-66.
DENG Qi, ZHANG Yingmin, ZENG Qi, et al. Comprehensive coordination control strategy for VSC-MTDC system[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(8): 59-66.
- [6] LIU X, WANG P, LOH P C. A hybrid AC/DC microgrid and its coordination control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 278-286.
- [7] 卢锦玲, 张津. 考虑暂态稳定约束的电力系统最优潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 24-30.
LU Jinling, ZHANG Jin. Optimal power flow algorithm with transient stability constraints in power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 24-30.
- [8] 许超, 陈昊, 屠秉慧. 考虑约束集混合筛选的预防安全约束鲁棒最优潮流[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 73-81.
XU Chao, CHEN Hao, TU Binghui. Preventive security constraint robust optimal power flow considering mixed constraints filtering[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 73-81.
- [9] TANG Y, DVIJOTHAM K, LOW S. Real-time optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2963-2973.
- [10] 邱迪. 交流/混合直流联合系统最优潮流分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
QIU Di. Optimal power flow analysis of AC/HVDC system[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2017.
- [11] YANG Z, ZHONG H, BOSE A, et al. Optimal power flow in AC-DC grids with discrete control devices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1461-1472.
- [12] 彭克, 张新慧, 陈羽. 适用于多端柔性互联的交直流配电网潮流计算方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 22-27.
PENG Ke, ZHANG Xinhui, CHEN Yu. Power flow calculation algorithm for AC-DC hybrid distribution

- network with multi-terminal flexible interconnection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 22-27.
- [13] 刘崇茹. 交直流混合输电系统运行特性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 21-22.
- [14] 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.
WEI Zhinong, JI Cong, SUN Guoqiang, et al. Interior point optimal power flow for AC-DC system with VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 89-95.
- [15] WANG Feng, ANH L T, TJERNBERG L B. A new approach for benefit evaluation of multi-terminal VSC-HVDC using proposed mixed AC/DC optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 432-443.
- [16] 梁梓均, 林舜江, 刘明波. 一种求解交直流互联电网分布式最优潮流的同步 ADMM 方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 28-36.
LIANG Zijun, LIN Shunjiang, LIU Mingbo. A synchronous ADMM algorithm for solving distributed optimal power flow of AC/DC interconnected power grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 28-36.
- [17] 罗天, 汪可友, 李国杰, 等. 对偶松弛的多区域柔性直流互联电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 68-76.
LUO Tian, WANG Keyou, LI Guojie, et al. Reactive power optimization in multi-area VSC-HVDC interconnected power grids based on Lagrangian dual relaxation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 68-76.
- [18] 和敬涵, 李智诚, 王小君, 等. 计及换流器损耗与电压下垂控制的交直流系统最优潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(22): 48-55.
HE Jinghan, LI Zhicheng, WANG Xiaojun, et al. Optimal power flow algorithm for hybrid AC/DC power systems considering power loss of converter and voltage-droop control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 48-55.
- [19] 柯圣舟, 郑欢, 林毅, 等. 计及柔性直流输电系统损耗模型的交直流电网无功优化[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3052-3058.
KE Shengzhou, ZHENG Huan, LIN Yi, et al. Reactive power optimization of AC and DC power grid considering loss model of flexible HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3052-3058.
- [20] ZHAO Q, GARCÍA-G J, GOMIS B O. Impact of converter losses on the optimal power flow solution of hybrid networks based on VSC-MTDC[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 151: 395-403.
- [21] BARADAR M, HESAMZADEH M R, GHANDHARI M. Second-order cone programming for optimal power flow in VSC-type AC/DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4282-4291.
- [22] ACHA E, KAZEMTABRIZI B, CASTRO L M. A new VSC-HVDC model for power flows using the Newton-Raphson method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2602-2612.
- [23] ELNAZ D, EBRAHIM B, BEHNAM M I. An efficient convexified SDP model for multi-objective optimal power flow[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 102: 254-256.
- [24] 赵越, 蒙毅, 李仁义. 基于粒子群优化算法分析约束条件对配煤最优价格的影响[J]. 热力发电, 2017, 46(12): 99-104.
ZHAO Yue, MENG Yi, LI Renyi. Influence of constraints on optimal price of blending coal by particle swarm optimization algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(12): 99-104.
- [25] LAVAEI J, LOW S H. Zero duality gap in optimal power flow problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 92-107.

收稿日期: 2019-09-14; 修回日期: 2019-10-26

作者简介:

张爽(1982—), 男, 通信作者, 硕士, 教授级高工, 研究方向为电力系统仿真、新能源并网检测评价、电能质量; E-mail: 375943243@qq.com

李宏强(1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统仿真分析; E-mail: lhq1652@126.com

王峰(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行仿真分析及控制设备闭环测试。E-mail: 3615389@qq.com

(编辑 张爱琴)