

DOI: 10.7667/PSPC151598

含 VSC-HVDC 交直流系统精确化离散最优潮流的研究

张昕, 王法, 杜俊杰, 曾东, 温镇

(嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 原对偶内点法在求解含电压源换流器的高压输电(Voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)的交直流系统最优潮流(Optimal power flow, OPF)问题时, 有较高的效率与准确性, 但是无法很好地解决含离散变量的 OPF(如无功优化), 而智能算法在解决此类问题时易于陷入局部最优解, 同时计算时间过长。因此提出一种含离散惩罚函数的混合内点法算法。算法的主要思想是以内点法为框架, 对连续变量进行优化, 在当对偶间隙小于一定值时, 对离散量的计算中引入罚函数, 同时随着迭代量差值的变化随时调整罚函数的罚因子的大小。通过算例表明, 该算法稳定性高, 寻优能力强, 能够很好地解决含 VSC-HVDC 交直流系统的离散变量的优化问题。

关键词: 交直流系统; 电压源换流器; 高压直流输电; 惩罚函数; 原对偶内点法; 最优潮流; 离散变量

Study of accurate discrete OPF problem of AC/DC system equipped with VSC-HVDC

ZHANG Xin, WANG Fa, DU Junjie, ZENG Dong, WEN Zhen

(State Grid Jiaying Power Supply Company, Jiaying 314000, China)

Abstract: Primal-dual interior point method has higher efficiency and accuracy while solving OPF problem of AC/DC system with VSC-HVDC, but it cannot solve the OPF problem with discrete variables (such as reactive power optimization), the intelligent algorithm is easy to fall into local optimal solution when solving the problem and cost too much time. Therefore, a hybrid interior point method with discrete penalty function is proposed. The main idea of this algorithm takes interior point method as framework, and optimizes the continuous variable. When the duality gap is less than a certain value, it introduces the penalty function into discrete variables calculation, and at the same time adjusts the penalty factor as the iteration difference change. The numerical example shows that the algorithm has good stability, strong ability of searching and can solve the optimization problem of the AC/DC system with VSC-HVDC containing discrete variables.

Key words: AC/DC system; voltage source converter; HVDC; penalty function; primal-dual interior point method; optimal power flow; discrete variable

0 引言

以电压源换流器(VSC)和全控型开关器件为基础的高压直流输电技术(Voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC), 成为了新一代的直流输电技术, 解决了传统高压直流输电中的许多技术难点, 同时也具有诸多优点, 如能对有功无功进行快速独立的控制; 能为交流侧提供快速的无功支持; 潮流翻转速度更快, 更易实现并联多段直流系统等。基于上述原因, VSC-HVDC以及交直流系统不仅会愈多的在实际工程中应用, 同时也成为众多学者的研究热点^[1-9]。

VSC-HVDC的元件特性与数学模型与传统高压直流输电模型存在较大的差异, 原有的适用于传统高压直流输电的交直流最优潮流的算法, 现已无法适用于VSC-HVDC系统的最优潮流计算。文献[10]中将交直流系统OPF模型用于无功优化配置方案的计算, 但是没有考虑VSC-HVDC系统; 文献[11]基于牛顿-拉夫逊法提出了含VSC-HVDC交直流系统的OPF问题的解决方案, 但由于该方法普遍采用迭代试验法, 通过编程实现存在难度。

原-对偶内点法(简称内点法)在处理连续变量优化问题上较大的优势, 其鲁棒性强、收敛性好, 但是在处理离散变量的优化问题时比较困难; 智能

算法有不错的离散变量处理能力, 文献[12-13]提出了内点法与遗传算法等智能算法相结合的混合算法, 来处理离散和连续变量的优化问题, 但是此类算法寻优速度过慢、计算时间较长, 同时在计算含 VSC-HVDC 交直流系统 OPF 问题时, 需要指定直流控制方式, 这将导致智能算法陷入局部最优解或者使算法发生振荡^[14]。

本文将提出一种含离散罚函数的内点算法, 采用内点法对交直流系统连续变量进行优化, 当达到某一条件时引入罚函数, 对离散变量进行约束及优化, 同时根据迭代量的变化, 不断调整罚函数的参数值, 最后达到对连续、离散变量同时寻优的目的。

1 含 VSC-HVDC 交直流系统数学模型

1.1 含 VSC-HVDC 的交直流系统的功率稳态方程

含 VSC-HVDC 交直流系统如图 1 所示, 系统一般由交流系统、换流站和直流网络 3 部分组成。

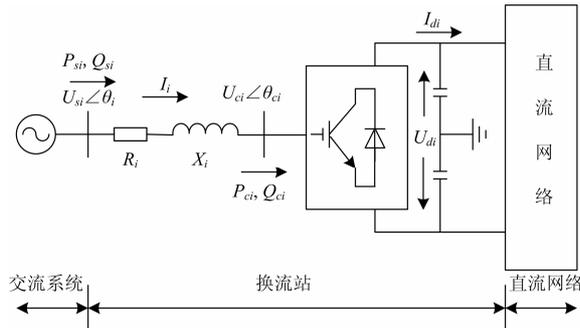


图 1 含 VSC-HVDC 交直流系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of AC/DC system containing VSC-HVDC

可令换流器的输入电压为 $\dot{U}_{ci} = U_{ci} \angle \theta_{ci}$; 注入该节点的交流节点的电压为 $\dot{U}_{si} = U_{si} \angle \theta_{si}$, 交流节点的功率为 $P_{si} + jQ_{si}$; 注入换流站的功率为 $P_{ci} + jQ_{ci}$, 换流站换流变压器的等效阻抗为 $R_i + jX_{Li}$ 。

通过上述假设, 计算出流过换流变压器的电流为

$$\dot{I} = (\dot{U}_{si} - \dot{U}_{ci}) / (R_i + jX_{Li}) \quad (1)$$

交流系统流入换流站的功率应满足式(2)。

$$P_{si} + jQ_{si} = \dot{U}_{si} (\dot{I})^* \quad (2)$$

可令 $\delta_i = \theta_{si} - \theta_{ci}$, $Y_i = 1 / \sqrt{R_i^2 + X_{Li}^2}$, $\alpha_i = \arctan(X_{Li}/R_i)$, 通过推导可以得到:

$$P_{si} = -U_{si} U_{ci} Y_i \cos(\delta_i + \alpha_i) + U_{si}^2 Y_i \cos \alpha_i \quad (3)$$

$$Q_{si} = -U_{si} U_{ci} Y_i \sin(\delta_i + \alpha_i) + U_{si}^2 Y_i \sin \alpha_i \quad (4)$$

为了消除换流器的有关方程, 使交流系统与直流系统通过方程直接关联, 使用换流器的输出电压

有效值与直流电压的关系:

$$U_{ci} = \mu_d M_i U_{di} / \sqrt{2} \quad (5)$$

在上式中, μ_d 为直流电压的利用率, 一般情况下 $0 < \mu_d < 1$, 调制方式设为 SPWM, 则 $\mu_d = \sqrt{3}/2$; M_i 为调制度^[15-17], 设定调制度为 $0 < M_i < 1$ 。

根据式(5), 可得到交流节点的注入功率与交流节点、直流节点相关参数量的关系:

$$P_{si} = -(\mu_d M_i / \sqrt{2}) U_{si} U_{di} Y_i \cos(\delta_i + \alpha_i) + U_{si}^2 Y_i \cos \alpha_i \quad (6)$$

$$Q_{si} = -(\mu_d M_i / \sqrt{2}) U_{si} U_{di} Y_i \sin(\delta_i + \alpha_i) + U_{si}^2 Y_i \sin \alpha_i \quad (7)$$

换流器的内部损耗与变压器损耗已由 R_i 等效, 因此直流功率 P_{di} 与注入换流桥的 P_{ci} 相等, 得

$$P_{di} = U_{di} I_{di} = (\mu_d M_i / \sqrt{2}) U_{si} U_{di} Y_i \cos(\delta_i - \alpha_i) - (\mu_d M_i / \sqrt{2})^2 U_{di}^2 Y_i \cos \alpha_i \quad (8)$$

其中, I_{di} 为直流节点电流。

1.2 含 VSC-HVDC 的交直流系统的控制方式

含 VSC-HVDC 交直流系统的控制方式比较灵活, 一般将以下变量作为控制目标: 直流节点上的交流电压 U_s 、直流电压 U_d 、流入环流变压器的交流功率 P_s 、 Q_s 。在进行潮流计算或最优潮流计算时, 系统中每个 VSC 需要选择两个控制变量, 一般有如下 4 种组合^[18]: 定 U_d 、定 Q_s 控制; 定 U_d 、定 U_s 控制; 定 P_s 、定 Q_s 控制; 定 P_s 、定 U_s 控制; 对常见的两端交直流系统而言, 其控制方式组合为上述两两组合, 而对于多段或多馈入系统而言, 组合方式将更加多元化。

1.3 含 VSC-HVDC 的交直流系统的修正方程

交直流系统同时包含交流与直流节点, 对不同类型的节点都需要进行修正。对交流节点, 其修正方程与传统潮流计算一致。

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i^s - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \Delta Q_i = Q_i^s - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (9)$$

对于 VSC 的直流节点而言, 方程为

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i^s - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - P_{si} \\ \Delta Q_i = Q_i^s - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - Q_{si} \end{cases} \quad (10)$$

式中: i, j 代表了节点的编号; P, Q, U 分别代表了有功、无功与电压幅值; θ, G, B 分别代表了相角、电导和电纳; P_i^s 与 Q_i^s 分别代表注入节点 i 的有功功率和无功功率。

直流系统的修正方程为

$$\begin{cases} \Delta P_{si} = P_{si} + (\mu_d M_i / \sqrt{2}) U_{si} U_{di} Y_i \cos(\delta_i + \alpha_i) - \\ \quad U_{si}^2 Y_i \cos \alpha_i \\ \Delta Q_{si} = Q_{si} + (\mu_d M_i / \sqrt{2}) U_{si} U_{di} Y_i \sin(\delta_i + \alpha_i) - \\ \quad U_{si}^2 Y_i \sin \alpha_i \\ \Delta P_{di} = P_{di} - (\mu_d M_i / \sqrt{2}) U_{si} U_{di} Y_i \cos(\delta_i - \alpha_i) + \\ \quad (\mu_d M_i / \sqrt{2})^2 U_{di}^2 Y_i \cos \alpha_i \end{cases} \quad (11)$$

式中, i 表示 VSC 的编号。

根据求解变量的个数, 需要增加直流网络方程:

$$\Delta I_{di} = I_{di} - \sum_{j=1}^{n_s} \frac{1}{R_{dij}} U_{dij} \quad (12)$$

式中, R_d 代表直流节点间电阻。

2 带罚函数的 VSC-HVDC 交直流系统精确化离散最优潮流

2.1 原-对偶内点法

内点法将对数壁垒函数引入牛顿法中, 用于处理非线性规划问题中的不等式约束^[18], 具体可以描述为

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } h(x) = 0 \\ g_{\min} < g(x) < g_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: x 为待求变量; $f(x)$ 为优化目标函数; $h(x)$, $g(x)$ 分别为等式约束与不等式约束; g_{\max} , g_{\min} 分别为不等式约束的上下限。

引入松弛变量 l , u , 并在目标函数中加入对数壁垒函数, 可将不等式约束转换为等式约束, 然后进行求解:

$$L = f(x) - y^T h(x) - z^T [g(x) - l - g_{\min}] - w^T [g(x) + u - g_{\max}] - \mu \sum_{j=1}^r \log(l_j) - \mu \sum_{j=1}^r \log(u_j) \quad (14)$$

式中, y , z , w 为拉格朗日乘子, 也称对偶变量。该优化问题极小值存在的必要条件是式(14)对所有的变量以及乘子的偏导数都为 0, 由此可以得

$$\begin{cases} L_x = \nabla_x f(x) - \nabla_x h(x)y - \nabla_x g(x)(z + w) = 0 \\ L_y = h(x) = 0 \\ L_z = g(x) - l - g_{\min} = 0 \\ L_w = g(x) + u - g_{\max} = 0 \\ L_l^\mu = \mathbf{L}z e - \mu e = 0 \\ L_u^\mu = \mathbf{U}w e + \mu e = 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中: $\mu = \sigma \text{Gap} / 2r$, $\text{Gap} = l^T z - u^T w$, Gap 称为对偶间隙, σ 称为中心参数; $\mathbf{L} = \text{diag}(l_1, \dots, l_r)$, $\mathbf{U} = \text{diag}$

(u_1, \dots, u_r) , $\mathbf{Z} = \text{diag}(z_1, \dots, z_r)$, $\mathbf{W} = \text{diag}(w_1, \dots, w_r)$,

其中 r 代表了不等式约束的个数。

将式(15)采用牛顿-拉夫逊法进行求解, 对其线性化可以得到修正方程组:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{L} & \mathbf{Z} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\mathbf{I} & 0 & 0 & -\nabla_x^T g(x) & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{U} & \mathbf{W} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{I} & \nabla_x^T g(x) & 0 \\ \nabla g(x) & 0 & \nabla g(x) & 0 & \mathbf{H} & \nabla h(x) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \nabla_x^T h(x) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z \\ \Delta l \\ \Delta w \\ \Delta u \\ \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_l^\mu \\ -L_z \\ -L_u^\mu \\ -L_w \\ L_x \\ -L_y \end{bmatrix} \quad (16)$$

将上式经过 k 次迭代, 得到原变量与对偶变量的修正值, 并进行更新, 最后得到方程的解, 具体步骤参见文献[18]。

2.2 带罚函数的 VSC-HVDC 交直流系统的最优潮流

交直流电力系统无功优化模型是一个非线性混合整数规划, 处理无功补偿容量和变压器变比这些离散变量十分关键, 文献[19]提出构造一个罚函数来模拟离散变量偏离可行点所造成的虚拟费用, 使其可以惩罚那些偏离了离散值的变量。该罚函数附加的虚拟费用会迫使离散控制变量某一个分级上靠拢, 从而把原问题转化为加入离散约束的非线性规划问题^[20-21]。值得一提的是, 这种二次罚机制并不是将离散变量强制靠在其最相邻分级上, 而会受到全局优化带来的费用降低的影响。

根据上述思路, 本论文引入一个正曲率二次罚函数, 其表达式为

$$\varphi(x_b) = \frac{1}{2} v_b (x_b - x_{b1})^2 \quad (17)$$

式中: v_b 为罚因子; x_{b1} 为离散变量 x_b 的邻域中心, 可以定义 x_{b1} 的邻域 $R(x_{b1})$ 为如下区间:

$$R(x_b) = \{x_b \mid x_{b1} - \frac{1}{2}S \leq x_b \leq x_{b1} + \frac{1}{2}S\} \quad (18)$$

其中, S 为其分级步长。

图 2 即为式(17)中所标示的二次罚函数 $\varphi(x_b)$,

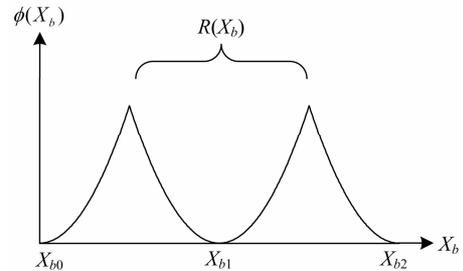


图 2 正曲率二次罚函数

Fig. 2 Normal curvature two penalty function

其中横坐标 x_b 为离散变量, x_{b0} 、 x_{b1} 、 x_{b2} 是 x_b 的三个相邻离散值。 x_{b1} 的邻域如图中 $R(x_{b1})$ 所示, 罚函数在邻域中心处最小, 而在邻域边界最大, 从而使离散变量在优化过程中向邻域中心靠拢。

将正曲率二次罚函数 $\varphi(x_b)$ 引入式(14)中, 可以得到:

$$L = f(x) - y^T h(x) - z^T [g(x) - l - g_{\min}] - w^T [g(x) + u - g_{\max}] - \mu \sum_{j=1}^r \log(l_j) - \mu \sum_{j=1}^r \log(u_j) + \frac{1}{2} v_b (x_b - x_{b1})^2 \quad (19)$$

通过引入式(17)形式的二次罚函数, 可以在计算过程中对离散变量起到一个约束作用, 使其规整到邻域中心。有文献验证在实际计算中, 该方法处理离散变量的效果与引入罚函数的时机和罚因子的大小密不可分^[22]。

首先, 引入二次罚函数到内点法计算中的时机至关重要。文献[23]指出, 在内点法迭代计算初期, 变量的修正值较大, 若此时引入二次罚函数则会干扰全局优化, 邻域中心频繁变动, 计算效率低下, 甚至有可能无法收敛至最优解。当 $Gap < 0.1$ 时, 此时邻域已基本确定, 引入二次罚函数能较好实现离散变量向邻域中心靠拢的功能。在内点法迭代后期, 变量修正值会越来越小, 当最优解基本确定下来, 若此时再引入二次罚函数, 则会增加迭代次数, 降低算法的收敛性。

其次, 罚因子的大小也会影响算法的效果。为使惩罚机制更加灵活, 可以对不同的离散变量根据其分级步长的大小而选取不同的罚因子。一般来说, 电容器的分级步长较大, 可以取罚因子为 50; 而对于有载调压变压器的变比, 一般来说分级步长较小, 可以将罚因子取为 500, 使得惩罚机制更加灵敏^[19]。另外考虑到罚因子的功能是增强离散变量向邻域中心靠拢的作用, 削弱向反方向运动的作用, 可以根据离散变量的运动方向动态调整罚因子的取值, 进一步提高算法的寻优效率。

本文将交直流系统网损最小作为目标函数:

$$\min f(x) = P_{\text{acloss}} + P_{\text{dcloss}} = \sum_{i=1}^n V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + \sum_{k=1}^{nd} I_{dk}^2 R_{dk} \quad (20)$$

式中: P_{acloss} 为交流系统网损; P_{dcloss} 为系统中的直流线路损耗。

综上所述, 可以得到带离散罚函数内点法的计算流程, 见图 3。

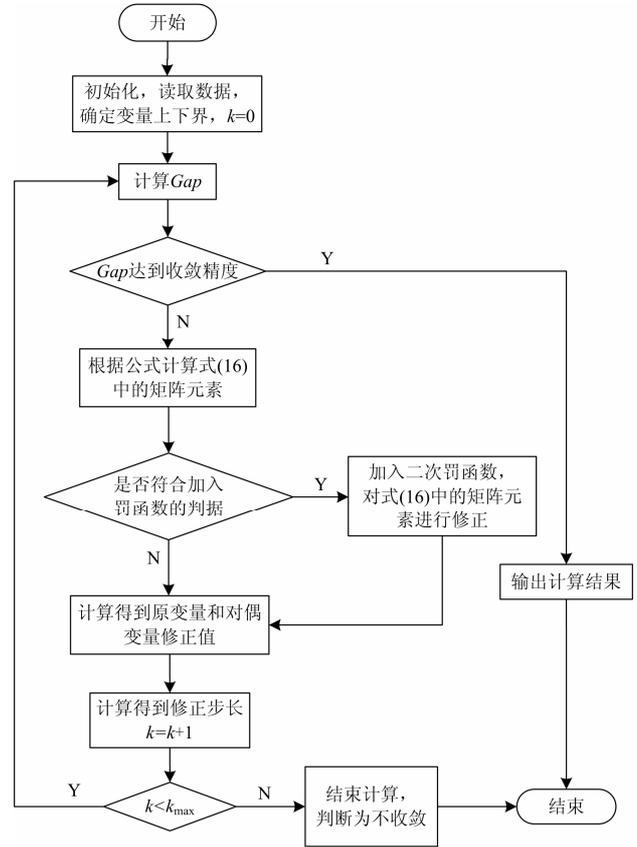


图 3 含离散惩罚函数的内点法计算流程

Fig. 3 Calculation process of interior point method containing discrete penalty function

3 算例分析

为验证本文算法的可行性, 下面通过两个算例来进行分析说明, 两个算例分别为 5 节点算例与 30 节点算例, 算例的交流系统参数可参见文献[24], 直流系统数据按照原系统的潮流计算结果给定, 下面进行具体分析。

3.1 5 节点系统计算分析

将 5 节点算例系统的 3-4 支路改为直流支路, 如图 4 所示。系统的直流参数如表 1 所示。

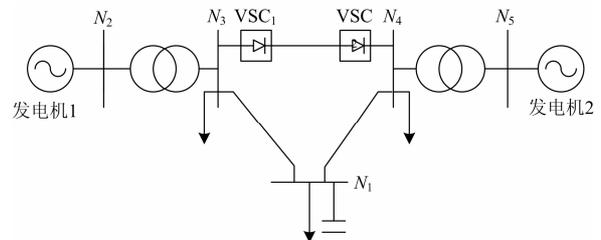


图 4 修改后 5 节点含 VSC-HVDC 交直流系统示意图

Fig. 4 A schematic diagram of the modified 5 node AC / DC system with VSC-HVDC

表 1 5节点系统直流参数

Table 1 DC parameters of 5 node system

节点号	R	X_L	P_S	Q_S	U_d
3	0.002 9	0.057 1	3.000 0	-0.575 7	2.000 0
4	0.002 9	0.057 1	-3.000 0	-0.400 0	2.000 0

对各参数的调节范围作以下的约定，对于连续变量，各个节点的电压上下限设为 $[0.9,1.1]$ ，VSC-HVDC的调制度上下限设为 $[0.5,1.0]$ ，直流电压上下限设定为 $[1.5,2.5]$ ，有功输电容量范围为 $[-4.0,4.0]$ ，无功输电容量范围为 $[-1.0,1.0]$ ，基准容量为100 MVA；对于离散变量，有载调压变压器的变比调节范围设定为 $[0.9,1.1]$ ，其调节步长为0.0125，在节点1处安装的无功补偿装置的容量范围为 $[0,4.0]$ ，调节步长为0.05。

收敛条件设定为当对偶间隙小于 10^{-6} 停止计算，最大迭代次数设定为100次；设定当对偶间隙小于0.1且离散量每次迭代值小于其步长的一半时，开始加入罚函数；罚函数的罚因子的初始值设定参见第三节中说明，当离散量每次迭代值小于其步长的四分之一且罚因子小于 5×10^7 时，每次迭代罚因子

增大10倍。

直流系统的控制方式设定为，OPF1为VSC1设定定电压控制和定无功功率控制，VSC2设定定有功功率控制和定无功功率控制；OPF2为VSC1设定定电压控制和定无功功率控制，VSC2设定定有功功率控制和定交流节点电压控制。

5节点的两种控制方式的收敛曲线见图5，各控制变量和直流参数的优化结果见表2。

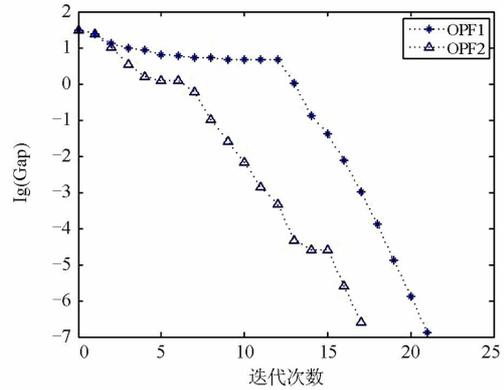


图 5 5节点系统本文算法的收敛曲线

Fig. 5 Convergence curve of the 5 node system

表 2 5节点系统优化结果

Table 2 Optimization results of 5 node system

控制方式	发电机		无功补偿	变压器		直流电压		直流电流	
	P_{G1}	P_{G2}	Q_c	K_1	K_2	U_{d1}	U_{d2}	I_{d1}	I_{d2}
OPF1	6.766 5	1.121 0	0.300 0	1.050 0	1.062 5	2.000 0	1.736 6	1.742 3	-1.742 3
OPF2	6.781 5	1.109 4	0.300 0	1.037 5	1.050 0	2.000 0	1.736 5	1.742 8	-1.742 8

控制方式	调制度		直流有功		直流无功		迭代次数	优化后网损	优化前网损
	M_1	M_2	P_{s1}	P_{s2}	Q_{s1}	Q_{s2}	k	f_{lost}	f_{lost}
OPF1	0.927 2	1.000 0	3.514 9	-3.000 0	-0.575 7	-0.400 0	21	1.063 1	1.092 0
OPF2	0.927 2	0.947 6	3.516 0	-3.000 0	-0.575 7	0.278 1	17	1.068 4	1.096 7

表2中优化前网损代表了经改造后的5节点交直流系统潮流计算得到的网损值。通过5节点算例表明，本文方法能够较好地计算含VSC-HVDC交直流系统的最优潮流，计算结果表明各变量均在限值范围内，网损较原系统有较大的改善，变压器、无功补偿的离散变量值均优化在步长节点上，表明该方法对离散变量的优化结果理想，同时迭代次数与计算时间均较为理想。

3.2 30节点系统计算分析

为了说明该方法的普遍适用性，对30节点系统进行计算分析。将30节点系统的2-4支路改造为直流支路，如图6所示。直流参数如表3所示。

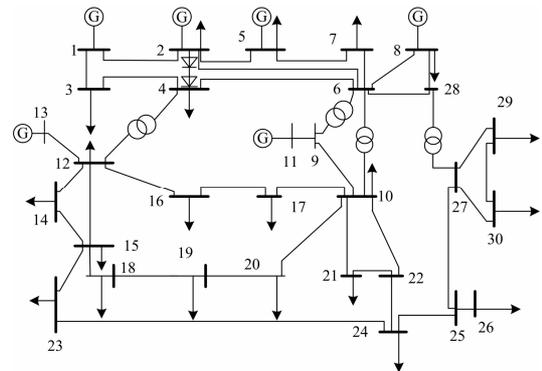


图 6 修改后30节点含VSC-HVDC交直流系统示意图

Fig. 6 A schematic diagram of the modified 30 node AC/DC system with VSC-HVDC

表 3 30节点系统直流参数

Table 3 DC parameters of 30 node system

节点号	R	X_L	P_S	Q_S	U_d
2	0.03	0.005	2.000 0	-2.000 0	2.000 0
4	0.03	0.005	-2.000 0	-0.100 0	2.000 0

各变量的设定为, 直流有功输电容量范围为 $[-3.0, 3.0]$, 无功输电容量范围为 $[-3.0, 3.0]$, 节点21与节点30处安装无功补偿装置, 其他变量的范围限值与5节点的设定一致。30节点的两种控制方式的收敛曲线见图7, 各控制变量和直流参数的优化结果见表4所示。

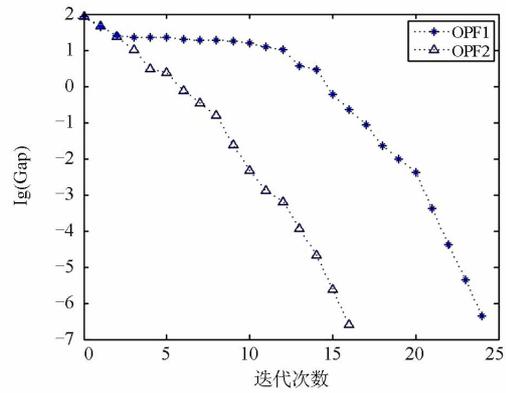


图7 30节点系统本文算法的收敛曲线

Fig. 7 Convergence curve of the 30 node system

表 4 30节点系统优化结果

Table 4 Optimization results of 30 node system

控制方式	发电机					无功补偿			
	P_{G1}	P_{G2}	P_{G3}	P_{G4}	P_{G5}	P_{G6}	Q_{c1}	Q_{c2}	
OPF1	1.826 1	0.800 0	0.500 0	0.350 0	0.300 0	0.120 0	0.050 0	0.050 0	
OPF2	1.776 6	0.800 0	0.500 0	0.350 0	0.300 0	0.120 0	0.150 0	0.050 0	
控制方式	变压器				直流电压		直流电流		
	K_1	K_2	K_3	K_4	U_{d1}	U_{d2}	I_{d1}	I_{d2}	
OPF1	0.900 0	1.100 0	0.900 0	0.962 5	2.000 0	1.684 1	1.263 7	-1.263 7	
OPF2	0.900 0	0.950 0	0.900 0	0.900 0	2.000 0	1.701 6	1.246 7	-1.250 1	
控制方式	调制度		直流有功		直流无功		迭代次数	优化后网损	优化前网损
	M_1	M_2	P_{S1}	P_{S2}	Q_{S1}	Q_{S2}	k	f_{ost}	f_{ost}
OPF1	0.775 8	1.000 0	2.880 5	-2.000 0	-2.000 0	-0.100 0	24	1.161 7	1.244 5
OPF2	0.793 6	1.000 0	2.839 8	-1.997 3	-2.000 0	0.601 6	16	1.119 3	1.191 5

表4中优化前网损代表了经改造后的30节点交直流系统潮流计算得到的网损值。通过上述计算结果同样可以得到, 各状态变量在限值内, 目标函数网损有了较好的改善, 离散变量优化在步长节点上, 同时迭代次数和计算时间都非常迅速, 说明该方法可以有效解决含VSC-HVDC的交直流系统的最优潮流。

同时, 在整个系统的电压平均值由原先的1.0225提升到1.0456, 整个系统的电压值有了提升且更加稳定, 特别是离电源点较远的节点, 其电压值有了较好地提升。

通过对图2和图4的分析, 两个系统的收敛曲线都是OPF2的控制方式下更加平滑, 由对比可知, OPF1与OPF2的两种控制方式的区别在于对VSC2节点是否进行无功功率的控制, OPF2没有对VSC2节点进行无功功率控制, 使得计算收敛更加顺利, 通过计算结果可以得到, 该点得无功功率在正值下系统达到最优的运行方式, 这表明了该点应为无功功率输出点, 而非开始设定的无功功率输入点。该

结果表明了系统对直流节点无功量的敏感性, 同时对表2、表4以及OPF1、OPF2控制方式分析可得, 本文的方法对直流变量能够有效控制, 使其固定在控制点上, 说明了该方法能对直流变量有较好的约束作用和优化作用。

3.3 多算例计算时间分析

对5、30、57、118节点的算例修改为含VSC-HVDC的交直流系统, 分别采用原对偶内点法、文献[25]中的统一混合算法以及本文算法进行计算, 控制方式采用OPF2, 电压限值为 $[0.9, 1.1]$, 在Matlab编程软件环境下各方法的计算平均时间见表5。

表 5 多算例计算时间

Table 5 Calculation time of multiple cases

算例	计算时间/s		
	内点法	统一混合法	本文算法
5	0.062 2	50.737 5	0.083 4
30	0.260 1	118.887 2	0.261 5
57	1.531 0	246.210 5	1.653 3
118	7.371 4	827.558 3	9.565 7

通过对多个算例多种方法的计算时间分析可以得到,内点法的计算速度最快,但是无法对离散变量进行有效优化,且未对直流量进行优化;统一混合算法虽然能够对离散量及直流变量进行优化,但是其计算时间较长,一般需要上千次的最优潮流计算,且当节点增加时,计算时间也将成倍增加;经综合对比可知,由于需要对离散变量进行处理导致文章算法比内点法的计算稍慢,但是所需的时间是在一个数量级上的,所以本文算法不仅可以对各算例进行有效优化,同时计算时间较快,数值稳定性好,可以很好地完成含VSC-HVDC交直流系统的最优潮流问题。

4 结论

本文研究了一种计算含VSC-HVDC交直流系统的OPF的方法,通过多个算例计算分析得到本文方法的几个特点:

(1) 较强的离散变量处理能力。本文的计算方法在内点法的基础上增加了对离散变量的处理,即利用了内点法的计算快速、寻优能力强的优点,又结合罚函数的方法对离散变量进行优化,使得本文方法的适用性更加广泛。

(2) 计算速度快、数值计算稳定。采用文章的方法计算速度较快,根据上述算例,一般迭代20次左右可以找到最优解,计算时间在秒级,而且计算结果数值稳定,计算可靠收敛。

以内点法为基础,通过添加罚函数的方式对其进行改造,使其拥有处理离散变量的能力,本文研究了其在含VSC-HVDC交直流系统中的计算应用,通过计算结果并与现有文献对比,证明了本文的方法在处理含VSC-HVDC交直流系统最优潮流的问题上,有较强的优势与适应能力。

参考文献

- [1] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.
- [2] 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 Jiali, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.
- [3] WEIMERS L. HVDC light: a new technology for a better environment[J]. IEEE Power Engineering Review, 1998, 18(8): 19-20.
- [4] 牛博彦, 胡林献, 张众. 基于 VSC-HVDC 的风电场并网系统潮流算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 6-11.
- NIU Boyan, HU Linxian, ZHANG Zhong. Research on power flow of wind farm grid-connected system based on VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 6-11.
- [5] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [6] 刘剑, 范春菊, 郜能灵. 考虑直流控制系统影响的 HVDC 输电线路后备保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 73-80.
LIU Jian, FAN Chunju, TAI Nengling. Backup protection research for HVDC transmission line considering the impact of DC control system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 73-80.
- [7] 孙晓云, 同向前, 高鑫. 柔性直流输电系统中 IGBT 阀的故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 235-264.
SUN Xiaoyun, TONG Xiangqian, GAO Xin. Research on the fault diagnosis of IGBT valve in VSC-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 235-264.
- [8] 罗永捷, 李耀华, 王平, 等. 多端柔性直流输电系统下垂控制 P-V 特性曲线时域分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 408-415.
LUO Yongjie, LI Yaohua, WANG Ping, et al. Time-domain analysis of P-V characteristic for droop control strategy of VSC-MTDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 408-415.
- [9] 边晓燕, 王本利, 陈建平, 等. 改进的 DFIG 与 VSC-HVDC 协调控制改善风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 9-16.
BIAN Xiaoyan, WANG Benli, CHEN Jianping, et al. Improvement of low voltage ride through capability of wind farm using coordinated control of the improved DFIG and VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 9-16.
- [10] 邸弢, 李华强, 范镔. 基于奇异值分解和内点法的交直流系统无功优化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 158-163.
DI Tao, LI Huaqiang, FAN Pei. Reactive power optimization of AC/DC power system based on singular value decomposition and interior point method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009,

- 24(2): 158-163.
- [11] PIZANO-MARTINEZ A, FUERTE-ESQUIVEL C R, AMBRIZ-PEREZ H, et al. Modeling of VSC-based HVDC systems for a Newton-Raphson OPF algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1794-1803.
- [12] 刘方, 颜伟, YU D C. 基于遗传算法和内点法的无功优化混合策略[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 67-72.
LIU Fang, YAN Wei, YU D C. A hybrid strategy based on GA and IPM for optimal reactive power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 67-72.
- [13] 丁晓群, 王艳华, 臧玉龙, 等. 基于内点法和改进遗传算法的无功优化组合策略[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 45-49.
DING Xiaoqun, WANG Yanhua, ZANG Yulong, et al. A combination strategy for reactive power optimization based on predictor-corrector interior point method and improved genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 45-49.
- [14] STORN R, PRICE K. Differential evolution: a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces[R]. Berkeley: University of California, 2006.
- [15] 张桂斌, 徐政, 王广柱, 等. 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): 17-22.
ZHANG Guibin, XU Zheng, WANG Guangzhu, et al. Steady-state model and its nonlinear control of VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 17-22.
- [16] 王冠, 蔡晔, 张桂斌, 等. 高压直流输电电压源换流器的等效模型及混合仿真技术[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 4-8.
WANG Guan, CAI Ye, ZHANG Guibin, et al. Equivalent model of HVDC-VSC and its hybrid simulation technique[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 4-8.
- [17] 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): 1-5.
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): 1-5.
- [18] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [19] 赵晋泉, 侯志俭, 吴际舜. 牛顿最优潮流算法中离散控制量的新处理方法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(23): 37-40.
ZHAO Jinquan, HOU Zhijian, WU Jishun. A novel quadratic penalty function based discretization algorithm for NEWTON optimal power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(23): 37-40.
- [20] 程莹, 刘明波. 含离散控制变量的大规模电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 54-60.
CHENG Ying, LIU Mingbo. Reactive-power optimization of large-scale power systems with discrete control variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 54-60.
- [21] LIU W H, PAPALEXOPOULOS A D, TINNEY W F. Discrete shunt controls in a newton optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(4): 1509-1518.
- [22] 卢艺. 电力系统混合整数无功优化问题的精确连续化方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
LU Yi. Research on an accurate algorithm for transforming mixed integer reactive-power optimization into continuous one in power systems[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [23] 程莹, 刘明波. 求解离散无功优化的非线性原-对偶内点算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(9): 23-27.
CHENG Ying, LIU Mingbo. Nonlinear primal-dual interior point algorithm for discrete reactive power optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(9): 23-27.
- [24] 吴际舜, 侯志俭. 电力系统潮流计算的计算机方法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999: 158-177.
- [25] 卫志农, 季聪, 郑玉平, 等. 计及 VSC-HVDC 的交直流系统最优潮流统一混合算法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 635-643.
WEI Zhinong, JI Cong, ZHENG Yuping, et al. Optimal power flow of AC-DC systems with VSC-HVDC based on a novel unified hybrid algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 635-643.

收稿日期: 2015-09-07; 修回日期: 2016-01-06

作者简介:

张 昕(1987-), 男, 工程师, 从事输配电线路研究。

E-main: robin7692008@sina.com

(编辑 姜新丽)