

DOI: 10.7667/PSPC161301

基于简化零空间内点法VSC-HVDC离散化最优潮流的研究

张昕, 张勇, 钱伟杰, 章慧芸, 胡仁

(嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 在求解含电压源换流器的高压直流输电(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, 常使用原对偶内点法或智能算法。但原对偶内点法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简化零空间内点算法。算法的主要思想是以简化零空间内点法(下称S-NSIPM)为框架, 对连续变量进行优化, 当收敛函数小于一定值时, 在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, 寻优和适应能力强, 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: VSC-HVDC; 简化零空间内点法; 最优潮流; 离散变量

Research on the optimal power flow of VSC-HVDC based on the simplified null space interior point method

ZHANG Xin, ZHANG Yong, QIAN Weijie, ZHANG Huiyun, HU Ren

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

Abstract: To solve the optimal power flow problem of VSC-HVDC system, the primal dual interior point method or intelligent algorithm is often used. However, the primal dual interior point method can not solve the OPF (such as reactive power optimization) with discrete variables. And intelligent algorithm is easy to fall into local optimal solution when solving this kind of problem and the computation time is too long. Therefore, a simplified null space interior point algorithm with discrete penalty function is proposed. The main idea of the algorithm is to optimize continuous variables within the framework of S-NSIPM. When the convergence function is less than a certain value, it adds penalty function into the calculation of discrete quantity, at the same time adjusts the penalty factor as the iteration between the iteration quantity changes. Numerical examples show that the algorithm has high stability, good adaptability and strong adaptability, and can solve the optimization problem of VSC-HVDC system with discrete variables.

Key words: VSC-HVDC; simplified null space interior point method; OPF; 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

不仅在实际工程中有更多的应用, 同时也成为众多学者的研究热点^[1-7]。

VSC-HVDC的元件特性和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算法现已无法适用于VSC-HVDC系统的最优潮流计算。文献[8]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[9]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。文献[10-11]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发生振荡^[12]。

文章研究了一种含离散罚函数的S-NSIPM,该算法用一个无约束二次规划的近似解作为预测步,再求解一个等式约束的二次规划得到一个零空间步作为迭代方向,同时结合离散罚函数,使得该方法在有效解决离散变量问题的同时也有较强的鲁棒性。

1 含VSC-HVDC交直流系统OPF模型

1.1 含VSC-HVDC的交直流系统的修正方程

含VSC-HVDC交直流系统的示意图如图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。

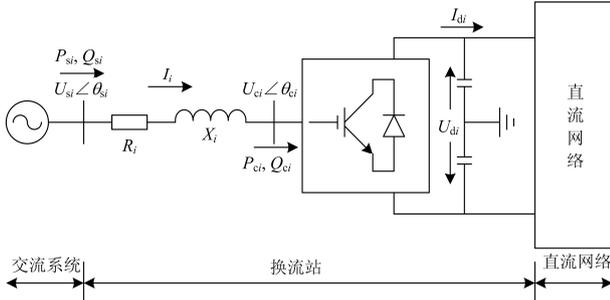


图1 含VSC-HVDC交直流系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of VSC-HVDC system

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 $R_i + jX_i$ 。

根据文献[13]推导,得到交直流系统的修正方程。对纯交流节点,其节点功率平衡方程与传统潮流计算一致,如式(11)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i^s - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \Delta Q_i = Q_i^s - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

而连有VSC的交流节点功率平衡方程为

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i^s - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - P_{si} \\ \Delta Q_i = Q_i^s - U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) - Q_{si} \end{cases} \quad (2)$$

式中: i, j 为节点的编号; P, Q, U 分别为有功、无功与电压幅值; θ, G, B 分别为相角、电导和电纳。

直流系统的修正方程为

$$\begin{cases} \Delta P_{si} = P_{si} + (\mu_d M_i / \sqrt{2}) U_{si} U_{di} Y_i \cos(\delta_i + \alpha_i) - U_{si}^2 Y_i \cos \alpha_i \\ \Delta Q_{si} = Q_{si} + (\mu_d M_i / \sqrt{2}) U_{si} U_{di} Y_i \sin(\delta_i + \alpha_i) - U_{si}^2 Y_i \sin \alpha_i \\ \Delta P_{di} = P_{di} - (\mu_d M_i / \sqrt{2}) U_{si} U_{di} Y_i \cos(\delta_i - \alpha_i) + (\mu_d M_i / \sqrt{2})^2 U_{di}^2 Y_i \cos \alpha_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: i 表示VSC的编号; μ_d 为直流电压的利用率,一般情况下 $0 < \mu_d < 1$, 这里调制方式设为SPWM, 则 $\mu_d = \sqrt{3}/2$; M_i 为调制度^[14-15], 这里设定调制度为 $0 < M_i < 1$ 。

根据求解变量的个数,需要增加直流网络方程:

$$\Delta I_{di} = I_{di} - \sum_{j=1}^{n_d} \frac{1}{R_{dij}} U_{dij} \quad (4)$$

式中, R_d 代表直流节点间电阻。

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^[16]: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交直流系统OPF模型

文章采用的OPF模型中,目标函数、等式约束方程和不等式约束方程依次如下。

1) 将交直流系统网损最小作为目标函数。

$$\min f(x) = P_{\text{acloss}} + P_{\text{dcloss}} = \sum_{i=1}^n V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + \sum_{k=1}^{nd} I_{dk}^2 R_{dk} \quad (5)$$

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

2) 等式约束方程为式(1)一式(4)以及交直流系统的控制方式方程。

3) 不等式约束为发电机有功和无功输出、无功补偿、交流电压、变压器变比、直流电压、调制度和注入直流节点的有功和无功功率的上下限约束。

2 含罚函数的S-NSIPM

2.1 S-NSIPM简介

电力系统的OPF模型可描述为

$$\begin{aligned} & \min f(x) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} h(x) = 0 \\ g_{\min} \leq g(x) \leq g_{\max} \end{cases} \end{aligned}$$

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, 可以将不等式约束转换为等式约束, 可以得到目标函数的拉格朗日函数为

$$\begin{aligned} L = & f(x) + y^T h(x) + z^T [g(x) - l - g_{\min}] + \\ & w^T [g_{\max} - u - g(x)] - \mu \sum_{j=1}^r \log(l_j) - \\ & \mu \sum_{j=1}^r \log(u_j) \end{aligned} \quad (6)$$

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满足 KKT 条件。

$$F(\hat{x}) = \begin{pmatrix} L_x = \nabla_x f(x) + \nabla_x h(x)y + \\ \quad \nabla_x g(x)(w-z) \\ L_y = h(x) \\ L_z = g_{\min} + l - g(x) \\ L_w = g(x) + u - g_{\max} \\ L_l^\mu = LZ e - \mu e \\ L_u^\mu = UWe - \mu e \end{pmatrix} = 0 \quad (7)$$

式中: $L = \text{diag}(l_1, \dots, l_r)$; $U = \text{diag}(u_1, \dots, u_r)$; $Z = \text{diag}(z_1, \dots, z_r)$; $W = \text{diag}(w_1, \dots, w_r)$; 其中 r 为不等式约束的个数。

在 S-NSIPM 中, 收敛条件为 $\|F(\hat{x})\|$, 小于某一线值, 但是在计算过程中, 由于 $L_x = \nabla_x f(x) + \nabla_x h(x)y + \nabla_x g(x)(w-z)$ 的存在, 导致 $\|F(\hat{x})\|$ 在迭代时会产生较大波动, 不能保证每一次迭代下降, 将 L_x 去掉, 剩下的部分记为 $O(\hat{x})$, 这样在每次迭代中 $\|O(\hat{x})\|$ 能较为平稳地下降并趋于 0, 同时由式(7)可见, $O(\hat{x})$ 中的函数均为 OPF 问题中的各类约束以及松弛变量的互补条件, 因此将 S-NSIPM 的收敛条件中的 $\|F(\hat{x})\|$ 更换为 $\|O(\hat{x})\|$ 具有实际意义。文中 $\|\bullet\|$ 均指欧几里得范数。

用传统内点法中求解电力系统最优潮流时, 若约束条件苛刻或初始点不可行, 则其求解过程中的线性化等式可能会导致算法不收敛或收敛于不可行点, S-NSIPM 克服了这一不足^[17], 其实质是对线性化等式右端项的扰动, 具体过程如下。

首先, 记:

$$\begin{aligned} r = & \begin{pmatrix} g_{\max} - u - g \\ g - l - g_{\min} \\ h \end{pmatrix}, R = \begin{pmatrix} \nabla g & -\nabla g & \nabla h \\ I & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \end{pmatrix}, \\ Q = & \begin{pmatrix} H & 0 & 0 \\ 0 & U^{-1}W & 0 \\ 0 & 0 & L^{-1}Z \end{pmatrix}, q = \begin{pmatrix} \nabla f \\ -\mu U^{-1}e \\ -\mu L^{-1}e \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

其中,

$$H = \nabla^2 f(x) + \nabla^2 g(x)(w-z) + \nabla^2 h(x)y$$

在 S-NSIPM 中, 利用一个由无约束二次规划得到的预测步, 来求解一个等式约束的二次规划, 得到一个零空间步作为迭代方向。首先, 预测步 \bar{d} 是由带罚参数 ρ 的无约束问题近似解产生, 即:

$$\min(d) = 1/2 d^T Q d + \rho \|R^T d + r\| \quad (9)$$

然后由带等式约束的二次规划的解产生零空间步, 即

$$\begin{cases} \min \psi(d) = \frac{1}{2} d^T Q d + q^T d \\ \text{s.t. } R^T d = R^T \bar{d} \end{cases} \quad (10)$$

其 KKT 条件为

$$\begin{cases} Qd + Rp = -q \\ R^T d = R^T \bar{d} \end{cases} \quad (11)$$

根据文献[17]中 2.3 节可知, 当 Q 在 R 的零空间上正定时, 式(10)与式(11)同解, 所以解得式(11)即可得到迭代方向。将 R 、 Q 、 q 、 d 、 p 代入式(11), 其中 $d = (\Delta x, \Delta u, \Delta l)$, $p = (w + \Delta w, z + \Delta z, y + \Delta y)$, 得到迭代方程为

$$\begin{pmatrix} H & 0 & 0 & \nabla g & -\nabla g & \nabla h \\ 0 & W & 0 & U & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z & 0 & L & 0 \\ \nabla g^T & I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\nabla g^T & 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ \nabla h^T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta u \\ \Delta l \\ \Delta w \\ \Delta z \\ \Delta y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -L_x \\ \mu e - Uw \\ \mu e - Lz \\ R^T \bar{d} \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中, $L_x = \nabla f + \nabla g(w-z) + \nabla h y$, 根据文献[18]可知, 通过式(9)来求解预测步 \bar{d} , 计算费时, 这对要求计算时间很短的电力系统来说是不可取的, 在 S-NSIPM 中 $R^T \bar{d}$ 可看作是 $-r$ 的扰动, 可简单地取为 $R^T \bar{d} = -0.95r$ 。每次迭代后由式(13)确定原始对偶变量的初始最大步长:

$$\begin{cases} s_p = 0.9995 \min \left\{ \min \left(\frac{-l_i}{\Delta l_i} \Big|_{\Delta l_i < 0}, \frac{-u_i}{\Delta u_i} \Big|_{\Delta u_i < 0} \right), 1 \right\} \\ s_d = 0.9995 \min \left\{ \min \left(\frac{-w_i}{\Delta w_i} \Big|_{\Delta w_i < 0}, \frac{-z_i}{\Delta z_i} \Big|_{\Delta z_i < 0} \right), 1 \right\} \end{cases} \quad (13)$$

再由式(14)—式(19)来更新变量值:

$$x^k = x^k + s_p \Delta x^k \quad (14)$$

$$u^k = \max \left\{ u^k + s_p \Delta u^k, -g(x^k + s_p \Delta x^k) + \bar{g} \right\} \quad (15)$$

$$l^k = \max \left\{ l^k + s_p \Delta l^k, -g(x^k + s_p \Delta x^k) - \underline{g} \right\} \quad (16)$$

$$y^k = y^k + s_d \Delta y^k \quad (17)$$

$$w_i^k = \begin{cases} \min \{ \gamma_2 \mu, (\zeta_1^k)_i \} / u_i^k & (\zeta_1^k)_i \geq \mu \\ \max \{ \gamma_1 \mu, (\zeta_1^k)_i \} / u_i^k & (\zeta_1^k)_i < \mu \end{cases} \quad (18)$$

$$z_i^k = \begin{cases} \min \{ \gamma_2 \mu, (\zeta_2^k)_i \} / l_i^k & (\zeta_2^k)_i \geq \mu \\ \max \{ \gamma_1 \mu, (\zeta_2^k)_i \} / l_i^k & (\zeta_2^k)_i < \mu \end{cases} \quad (19)$$

其中

$$\zeta_1^k = \text{diag}(u^k + s_p \Delta u^k)(w^k + s_d \Delta w^k)$$

$$\zeta_2^k = \text{diag}(l^k + s_p \Delta l^k)(z^k + s_d \Delta z^k)$$

2.2 S-NSIPM 离散变量处理

交直流电力系统最优潮流模型是一个非线性混合整数规划模型, 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向某一个分级上靠拢, 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, 这种惩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

$$\varphi(x_b) = \frac{1}{2} v_b (x_b - x_{b1})^2 \quad (20)$$

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:

$$R(x_b) = \{x_b \mid x_{b1} - \frac{1}{2}S \leq x_b \leq x_{b1} + \frac{1}{2}S\} \quad (21)$$

式中, S 为其分级步长。

将正曲率二次罚函数 $\varphi(x_b)$ 引入式(6)中, 可以得到:

$$\begin{aligned} L = & f(x) + y^T h(x) + z^T [g(x) - l - g_{\min}] + \\ & w^T [g_{\max} - u - g(x)] - \mu \sum_{j=1}^r \log(l_j) - \\ & \mu \sum_{j=1}^r \log(u_j) + \frac{1}{2} \sum v_b (x_b - x_{b1})^2 \end{aligned} \quad (22)$$

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]。首先引入时机定为 $O(\hat{x}) < 0.1$, 此时邻域已基本确定, 引入二次罚函数能较好地实现离散变量向邻域中心靠拢的功能。其次, 设定罚因子的大小, 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, 削弱其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。

综上所述, 含离散罚函数的 S-NSIPM 综合流程图如图 2。

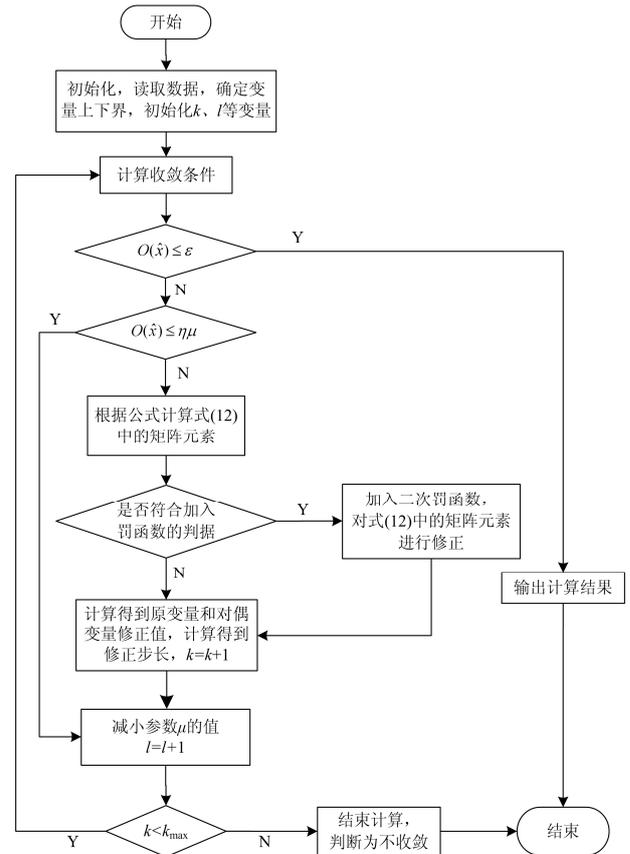


图 2 含离散惩罚函数的 S-NSIPM 计算流程

Fig. 2 Calculation process of interior point method containing discrete penalty function

3 算例分析

3.1 多算例计算分析

利用S-NSIPM, 用Matlab编写程序, 对5、30、118节点系统进行计算分析, 算法参数设置为: $\mu=0.9$, $\eta=50$, $\gamma_1=0.75$, $\gamma_2=600$, 收敛条件为 $\|O(\hat{x})\| < 10^{-5}$, 此外, 在算法步骤中, 需要减小 μ 的值时, 取 μ 为 0.06μ 。

含VSC-HVDC交直流系统中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, 为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, 为VSC2设定定有功功率控制和定交流节点电压控制。

对3个系统进行直流支路改造, 直流参数见表1, 5节点系统在节点1处加装无功补偿装置, 30节点系统在节点21与节点30处安装无功补偿装置, 118节点系统在节点76处安装无功补偿装置。

表1 多节点系统直流参数

Table 1 DC parameters of 5-node system

系统名称	节点号	R	X_L	P_s	Q_s	U_d
5节点	2	0.0388	0.0571	1.4155	-0.2443	2.0000
	3	0.0388	0.0571	-1.2774	0.2032	2.0000
30节点	2	0.03	0.1	0.1575	0.0985	2.0000
	4	0.03	0.1	-0.1554	-0.1314	2.0000
118节点	5	0.005	0.1	0.7667	-0.0375	2.0000
	11	0.005	0.1	-0.7546	0.0609	2.0000

对各参数的调节范围作以下的约定, 对于连续

变量, 节点的电压设为[0.9, 1.1], VSC-HVDC的调制度设为[0.5, 1.0], 直流电压设定为[1.5, 2.5], 有功输电容量设为[-3.0, 3.0], 无功输电容量设为[-3.0, 3.0], 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, 无功补偿装置的容量为[0, 4.0], 调节步长为0.05。

设定当 $O(\hat{x})$ 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3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。

经计算, 3个系统的计算结果及收敛曲线如图3—图5。

表2中原网损代表了经改造后的交直流系统潮流计算得到的网损值。通过表2、表3计算结果可以得到, 各直流状态变量在限值内, 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, 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, 对于两种不同控制方式下的电压平均值均有较好的改善, 5节点系统电压值分别从1.0411、1.0602提升到1.0808、1.0889, 30节点系统电压值分别从1.0194、1.0463提升到1.0707、1.0639, 118节点系统电压值分别从0.9878、0.9895提升到1.0866、1.0872, 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, 其电压值有了较好的提升。

表2 多节点系统优化结果

Table 2 Optimization results of multi-node system

系统名称	控制方式	直流电压		直流电流		注入直流节点有功功率	
		U_{d1}	U_{d2}	I_{d1}	I_{d2}	P_{s1}	P_{s2}
5节点	OPF1	2.0000	1.9738	0.6760	-0.6760	1.4214	-1.2774
	OPF2	2.0000	1.9739	0.6737	-0.6737	1.4144	-1.2774
30节点	OPF1	2.0000	1.9977	0.0783	-0.0783	0.1575	-0.1554
	OPF2	2.0000	1.9977	0.0782	-0.0782	0.1572	-0.1554
118节点	OPF1	2.0000	1.9981	0.3789	-0.3789	0.7601	-0.7546
	OPF2	2.0000	1.9981	0.3799	-0.3799	0.7622	-0.7546

系统名称	控制方式	注入直流节点无功功率		调制度		网损 f_{lost}	原网损 f_{lost}
		Q_{s1}	Q_{s2}	M_1	M_2		
5节点	OPF1	-0.2443	0.2032	0.8513	0.9161	0.1741	0.2304
	OPF2	-0.2443	0.0001	0.8633	0.9489	0.1680	0.2127
30节点	OPF1	0.0985	-0.1314	0.8862	0.9062	0.0575	0.1066
	OPF2	0.0985	-0.0704	0.8822	0.9080	0.0596	0.1867
118节点	OPF1	-0.0375	0.0609	0.8999	0.8863	0.9702	2.6325
	OPF2	-0.0375	-0.7223	0.8999	0.9570	0.9736	3.2477

表 3 多节点系统优化结果

Table 3 Optimization results of multi-node system

变量名称		5 节点		30 节点		118 节点	
		OPF1	OPF2	OPF1	OPF2	OPF1	OPF2
无功补偿	Q_{c1}	0.3500	0.3000	0.2000	0.2000	0.2500	0.2500
	Q_{c2}	—	—	0.0500	0.0500	—	—
	K_1	0.9875	1.0000	1.0500	1.0750	1.0500	1.0625
变 压 器 变 比	K_2	1.0125	1.0625	1.0500	1.0625	0.9875	0.9875
	K_3	—	—	0.9750	1.0375	1.0125	1.0250
	K_4	—	—	1.0250	1.0375	1.0125	1.0125
	K_5	—	—	—	—	1.0250	1.0125
	K_6	—	—	—	—	0.9875	0.9875
	K_7	—	—	—	—	1.0125	1.0125
	K_8	—	—	—	—	1.0250	1.0250
	K_9	—	—	—	—	1.0125	1.0125

3.2 S-NSIPM 鲁棒性分析

S-NSIPM 的鲁棒性也是其一大优势, 当计算条件更加苛刻或更改初始点设置时, 其也能有效收敛。

以 30 节点系统为例, 将交流电压的上下限值由原先的[0.9, 1.1]变更为[0.97, 1.03], 直流电压的上下限值由[1.5, 2.5]变更为[1.8, 2.2], 两种控制方式的收敛曲线及计算结果如图 6 和表 4 所示。

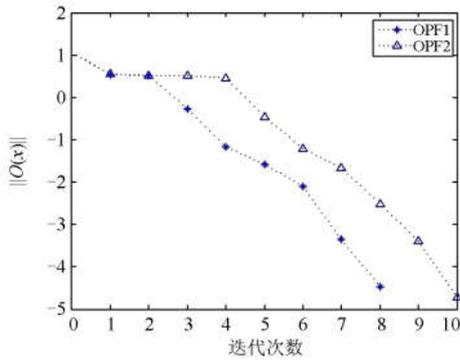


图 3 5节点系统本文算法的收敛曲线

Fig. 3 Convergence curve of the 5-node system

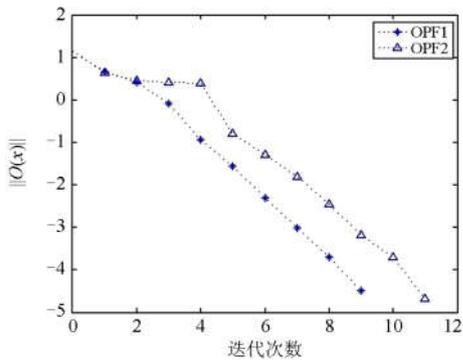


图 4 30节点系统本文算法的收敛曲线

Fig. 4 Convergence curve of the 30-node system

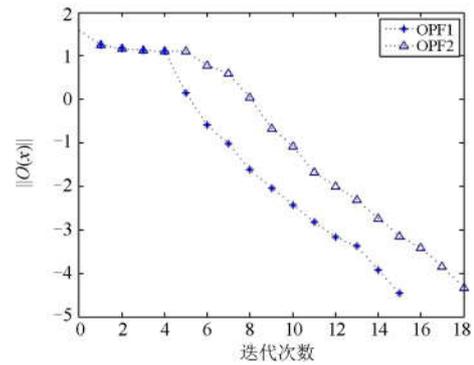


图 5 118节点系统本文算法的收敛曲线

Fig. 5 Convergence curve of the 118-node system

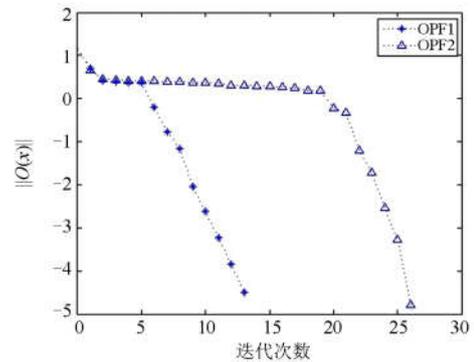


图 6 30节点系统的收敛曲线

Fig. 6 Convergence curve of the 30-node system

由图 6 和表 4 可知, 当不等式约束条件更为苛刻时, 该方法依然可以有效收敛, 对 5 节点系统与 118 节点系统进行计算, 可得同样的结论。

将 30 节点系统的交流电压初值分别设为 0.9 和 1.1, 相角初值依然为 0, 控制方式采用 OPF1, 电压初值设为 0.9 时记为方式 1, 设为 1.1 时记为方式 2, 经计算可有效收敛, 收敛图如图 7 所示。

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	0.5200	0.8000	0.5000	0.3500	0.3000	0.4000	0.3000	0.1000	
OPF2	0.5296	0.8000	0.5000	0.3500	0.3000	0.4000	0.3000	0.1000	
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	1.0375	1.0375	0.9625	1.0000	2.0000	1.9976	0.0784	-0.0784	
OPF2	1.0500	1.0375	1.0000	1.0250	2.0000	1.9976	0.0796	-0.0789	
控制方式	调制度		直流有功		直流无功		迭代次数	优化后	优化前
	M_1	M_2	P_{S1}	P_{S2}	Q_{S1}	Q_{S2}		网损	网损
OPF1	0.8282	0.8498	0.1578	-0.1554	-0.0985	-0.1314	14	0.0677	0.1066
OPF2	0.8235	0.8625	0.1605	-0.1554	-0.0982	-0.2120	27	0.0708	0.1867

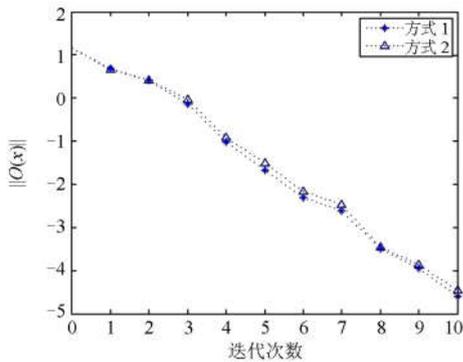


图 7 30节点系统的收敛曲线

Fig. 7 Convergence curve of the 30-node system

3.3 S-NSIPM 计算时间比较

将 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(记为方法1)、文献[23]中的统一混合算法(记为方法2)以及本文算法(记为方法3)进行计算, 控制方式采用 OPF2, 交流电压限值为[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			迭代次数
	方法1	方法2	方法3	方法3
5节点	0.0622	50.7375	0.0852	11
30节点	0.2601	118.8872	0.6378	12
57节点	1.5310	246.2105	7.6533	15
118节点	7.3714	827.5583	13.0060	19

通过对多个算例多种方法的计算时间分析可以得到: 方法1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; 方法2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

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

1) 较强的离散变量处理能力。文章中的计算方法在 S-NSIPM 的基础上增加了对离散变量的处理, 既利用了 S-NSIPM 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, 使得文章的方法有较强的离散变量处理能力。

2) 算法适应性好, 鲁棒性强。算法在约束条件变得苛刻的情况下依然可以有效收敛, 可以处理应对更多的情况。

3) 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 S-NSIPM 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] 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.
- [2] 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.
- [3] 刘剑, 范春菊, 邵能灵. 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.
- [4] 张昕, 王法, 杜俊杰, 等. 含 VSC-HVDC 交直流系统精确化离散最优潮流的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 118-125.
ZHANG Xin, WANG Fa, DU Junjie, et al. Study of accurate discrete OPF problem of AC/DC system equipped with VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 118-125.
- [5] 郑超, 王贺楠, 刘洪涛, 等. 基于用户自定义程序的 VSC-HVDC 机电电磁混合仿真研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 168-174.
ZHENG Chao, WANG Henan, LIU Hongtao, et al. Study of the electromechanical and electromagnetic hybrid simulation for VSC-HVDC based on PSASP/UIPI[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 168-174.
- [6] 李国庆, 孙银锋, 吴学光. 柔性直流输电稳定性分析及控制参数整定[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 231-239.
LI Guoqing, SUN Yinfeng, WU Xueguang. VSC-HVDC stability analysis and control parameter setting[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 231-239.
- [7] 杨悦, 李国庆. 基于 VSC-HVDC 的海上风电小干扰稳定控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(13): 101-110.
YANG Yue, LI Guoqing. The small signal stability control of offshore wind farm based on VSC-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(13): 101-110.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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 Xiaqun, 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.
- [12] STORN R, PRICE K. Differential evolution: a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces[R]. Berkeley: University of California, 2006.
- [13] 卫志农, 纪聪, 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 of AC-DC system with VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 89-95.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] LIU Xinwei, YUAN Yaxiang. A null-space primal-dual interior-point algorithm for nonlinear optimization with nice convergence properties[J]. Mathematical Programming, 2010, 125(1): 163-193.
- [18] 全然, 简金宝, 韦化. 基于零空间的现代内点最优潮流新算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(5): 12-17. QUAN Ran, JIAN Jinbao, WEI Hua. New algorithm of interior point optimal power flow based on null space[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(5): 12-17.
- [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
- [23] 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: 2016-08-14; 修回日期: 2017-02-22

作者简介:

张 昕(1987—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: robin7692008@sina.com

(编辑 葛艳娜)