

# 基于非线性内点理论的交直流系统无功优化新模型

聂永辉<sup>1,2</sup>, 李天云<sup>3</sup>, 刘凤兰<sup>4</sup>, 杜正春<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学教务处, 吉林 吉林 132012; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049;  
3. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 4. 吉林实验中学, 吉林 吉林 132010)

**摘要:** 在交流侧有载调压变压器 (Load tap changing transformer, LTC) 支路中引进虚拟节点, 并通过虚拟节点的电压来表示有载可调变压器支路功率方程; 对于直流系统, 在换流变压器的理想变压器和换流阻抗之间引进一个虚拟节点, 虚拟节点电压幅值等一些变量被用来表示换流器支路方程; 耦合方程把不同坐标系下的方程耦合到一起, 由此建立了交直流混合系统无功优化问题的二阶新模型。预测-校正原对偶内点法被用来实现这个无功优化问题, 该模型的海森矩阵在优化过程中是恒常矩阵, 只需要计算一次, 这样缩短了内点法的计算总时间。通过测试系统对新模型与传统模型进行仿真计算比较, 结果验证了所建模型有较好的收敛特性。

**关键词:** 交直流系统; 有载可调变压器; 换流器; 无功优化

## A new AC-DC reactive optimal power flow model based on nonlinear interior point method

NIE Yong-hui<sup>1,2</sup>, LI Tian-yun<sup>3</sup>, LIU Feng-lan<sup>4</sup>, DU Zheng-chun<sup>2</sup>

(1. Academic Administration Office, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. College of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;  
4. Jilin Shiyan Middle School, Jilin 132010, China)

**Abstract:** For the AC system, the artificial node voltage is used to express the LTC branch power equations. For the DC system, an artificial node is introduced to locate between the ideal transformer and commuting impedance. Some variables such as artificial node voltage amplitude corresponding to the converter branch are included to express the converter equation. The coupling equations integrate the quadratic AC and DC equations from the different coordinates into a united quadratic AC-DC ORPF model. The predictor-corrector primal-dual interior point method (PCPDIPM) is used to implement the optimization. The Hessian matrices in this model are constant and require to be computed only once in the optimal process, which speed up the calculation greatly. The simulation results show that the proposed method achieves a good convergence property than the conventional one.

**Key words:** AC-DC power system; load tap changing transformer; converter; reactive optimization

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)10-0035-06

## 0 引言

对于交直流混合系统, 在其网络结构和参数、负荷功率和发电机有功注入给定的情况下, 在满足系统各种设备和运行限制条件下, 如何通过各种调节控制措施, 使交直流混合系统的有功网络损耗达到最小, 这就是交直流混合系统的无功优化问题<sup>[1-3]</sup>。目前, 对交流电力系统无功优化问题的研究已经非常成熟, 但对交直流系统无功优化问题还有待进一步研究。

目前, 非线性预测-校正原对偶内点法因具有计算的数值稳定性和快速的收敛特性等优点而被认为

是求解大规模OPF问题较有效的方法<sup>[4-9]</sup>。该算法需要计算模型中各个函数对应的海森矩阵, 但对于现有的优化模型, 其各个函数是优化变量的高阶函数, 导致对应的海森矩阵不是常数, 这就需要在优化计算中对其不断进行更新, 为此增加了优化总时间。因此如何把高阶模型转变成二阶模型, 提高优化速度, 对内点法来说是一个有意义的课题。

文献[7]在直角坐标系中建立了基于非线性内点法的交流最优潮流问题, 但由于有载调压支路模型中变比变量的存在, 该构建格式并不完全是二次的; 文献[8]通过在有载调压支路模型中引进虚拟节点, 由此建立了基于直角坐标系下的二次无功优化

新模型, 模型中各个函数对应的海森矩阵在迭代过程中只需要计算一次, 从而减少优化时间, 但那只应用于交流系统; 文献[10]提出了基于直角坐标系的交直流混合系统六次潮流模型, 模型中各个函数对应的海森矩阵不是常数。

基于上述分析, 本文通过在交流侧有载可调变压器支路模型中引进虚拟节点, 并通过虚拟节点的电压来表示有载可调变压器支路功率方程, 使其不含有变压器变比这个变量。对于直流系统, 在换流变压器的理想变压器和换流阻抗之间引进一个虚拟节点, 虚拟节点电压幅值等一些变量被用来表示换流器支路方程; 耦合方程把不同坐标系下的方程耦合到一起, 由此建立了交直流混合系统无功优化问题的二阶新模型。预测-校正原对偶内点法用来实现这个无功优化问题, 该模型的海森矩阵在迭代过程中是恒常矩阵, 只需要计算一次, 这样减少了内点法的计算机消耗总时间。

## 1 交流系统 LTC 支路和直流系统换流器二次模型

### 1.1 交流系统 LTC 支路二次模型

有载调压变压器支路经典模型如图1所示, 其中,  $t$  为理想变压器变比,  $y_i = g_i + jb_i$  代表导纳,  $i$  和  $j$  分别是有载调压变压器的标准侧节点、非标准侧节点,  $\dot{V}_i = e_i + jf_i$  和  $\dot{V}_j = e_j + jf_j$  是标准侧和非标准侧节点电压,  $\dot{S}_{Tij} = P_{Tij} + jQ_{Tij}$  和  $\dot{S}_{Tji} = P_{Tji} + jQ_{Tji}$  是标准侧和非标准侧节点注入功率。

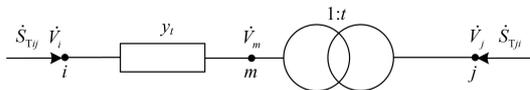


图1 LTC 等效模型

Fig. 1 LTC equivalent model

由于 LTC 变比的存在, 导致有载调压变压器支路功率均是变比和电压的高次函数, 其对应的海森矩阵不是常数, 因此在基于预测-校正原对偶内点的优化计算中, 每次迭代时都需要计算它们, 这增加了整个优化时间。为此, 文献[8]在理想变压器和串联导纳之间引进一个虚拟节点, 如图1所示, 由于理想变压器是无损耗的, 则有载调压变压器支路功率方程可表示为<sup>[8]</sup>

$$P_{Tij} = P_{Tmi} = (e_m^2 + f_m^2 - e_m e_i - f_m f_i)g_i + (e_m f_i - e_i f_m)b_i \quad (1)$$

$$Q_{Tji} = Q_{Tmi} = -(e_m^2 + f_m^2 - e_m e_i - f_m f_i)b_i + (e_m f_i - e_i f_m)g_i \quad (2)$$

$$P_{Tij} = P_{Tmi} = (e_i^2 + f_i^2 - e_m e_i - f_m f_i)g_i + (e_i f_m - e_m f_i)b_i \quad (3)$$

$$Q_{Tij} = Q_{Tmi} = -(e_i^2 + f_i^2 - e_m e_i - f_m f_i)b_i + (e_i f_m - e_m f_i)g_i \quad (4)$$

由于理想变压器是无损的, 则其两侧电压应满足下列关系:

$$f_j - t_{jm} f_m = 0 \quad (5)$$

$$e_j - t_{jm} e_m = 0 \quad (6)$$

通过在有载调压变压器支路引入一个虚拟节点, 上述所有方程均是电压和变比变量的二次函数。

### 1.2 直流系统换流器二次模型

对于和交流系统节点  $i$  ( $i=1, \dots, n_d$ ) 相联的换流器, 如图2所示, 采用标么值表示时, 其平均直流电压为

$$V_{di} - (k_{di} V_i \cos \theta_{di} - X_{di} I_{di}) = 0 \quad (7)$$

其中:  $V_i$  为交流节点  $i$  的电压幅值, 当交流侧采用直角坐标系时,  $V_i$  可表示为  $V_i = \sqrt{e_i^2 + f_i^2}$ ;  $V_{di}, I_{di}, X_{di}, k_{di}, \theta_{di}$  分别是直流电压、直流电流、换流电抗、换流变压器变比, 换流器控制角;  $n_d$  为换流器个数。

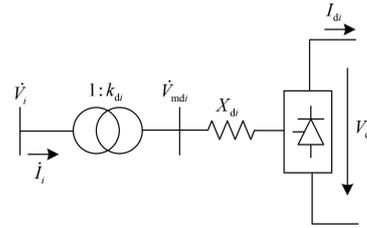


图2 换流器等效模型

Fig. 2 Converter equivalent model

假设换流器是无损耗的, 平均直流电压还可以表示为

$$V_{di} - k_r k_{di} V_i \cos \varphi_i = 0 \quad (8)$$

其中:  $\varphi_i$  为换流器的功率因数角。

忽略换流器的损耗, 换流器的有功功率为

$$P_{di} - V_{di} I_{di} = 0 \quad (9)$$

换流器从交流侧吸收的无功功率为

$$Q_{di} - V_{di} I_{di} \tan \varphi_i = 0 \quad (10)$$

由上可知, 式(7)~式(10)是优化变量的高阶函数, 其对应的海森矩阵不是常数, 因此在基于预测-校正原对偶内点的无功优化计算中, 每次迭代时都需要计算它们, 这增加了整个优化时间。为了把它们变成二次方程, 首先对交流节点  $i$  引入其电压幅值  $V_i$  和电流幅值  $I_i$  作为优化变量, 用它们的实部和虚部表示换流器支路交流侧功率, 如图2所示; 其次不直接用  $\theta_{di}$  而用其余弦  $\cos \theta_{di}$  作为直流侧变量;

最后在换流变压器的换流阻抗和理想变压器之间引进一个虚拟节点电压幅值变量  $V_{\text{mdi}}$  作为优化变量。经过上述处理, 可以在极坐标系下建立直流系统的方程, 直流系统的方程只与电压、电流幅值变量有关, 而与相角无关, 则上述方程变成:

$$V_{\text{mdi}} - k_{\text{di}} V_i = 0 \quad (11)$$

$$V_{\text{di}} - (V_{\text{mdi}} \cos \theta_{\text{di}} - X_{\text{di}} I_{\text{di}}) = 0 \quad (12)$$

$$P_{\text{di}} - (e_i a_i + f_i b_i) = 0 \quad (13)$$

$$Q_{\text{di}} - (f_i a_i - e_i b_i) = 0 \quad (14)$$

忽略换流器的损耗, 直流功率等于交流基波的有功功率:

$$V_{\text{di}} I_{\text{di}} - (e_i a_i + f_i b_i) = 0 \quad (15)$$

交流电流基波分量的有效值和直流电流的关系为

$$I_i - k_r k_{\text{di}} I_{\text{di}} = 0 \quad (16)$$

式中,  $k_r$  是等于 0.995 的常数, 这里取为 1。

直流网络方程为

$$\pm I_{\text{di}} - \sum_{j=1}^{n_{\text{di}}} g_{\text{dij}} V_{\text{dj}} = 0 \quad (17)$$

换流器一般有定电压、定电流、定功率、定控制角和定换流器变压器变比五种基本控制方式, 其控制方式必须根据交直流混合系统的实际运行需要加以指定, 简写为

$$x_{\text{d1i}} - x_{\text{d1i}}^{\text{sp}} = 0 \quad (18)$$

$$x_{\text{d2i}} - x_{\text{d2i}}^{\text{sp}} = 0 \quad (19)$$

其中:  $x_{\text{d1i}}$  和  $x_{\text{d2i}}$  代表直流电压, 直流电流, 直流功率, 换流器变压器变比和控制角的余弦等变量之一。

引入的电压幅值变量和电流幅值变量是极坐标系下的变量, 而它们的实部和虚部是直角坐标系下的变量, 它们通过下列关系, 把不同坐标系下的方程耦合到一起, 形成统一交直流混合系统模型。

$$\frac{1}{2} V_i^2 - \frac{1}{2} e_i^2 - \frac{1}{2} f_i^2 = 0 \quad (20)$$

$$\frac{1}{2} I_i^2 - \frac{1}{2} a_i^2 - \frac{1}{2} b_i^2 = 0 \quad (21)$$

可以看出, 经过上述处理, 直流侧方程式(11)~式(19)和耦合方程式(20)~式(21)都是二次函数。

## 2 交直流混合系统二次无功优化新模型

按照引入电流  $I_i = a_i + j b_i$  的参考方向, 对于节点  $i$  ( $i=1, \dots, n_B$ ), 交直流混合系统的节点功率平衡方程为

$$\sum_{ij \in S_{L_i}} [G_{ij}(e_i e_j + f_i f_j) + B_{ij}(f_i e_j - e_i f_j)] + \sum_{ij \in S_{T_i}} P_{Tij} + \lambda_{P_i} P_{\text{di}} - P_{G_i} + P_{L_i} = 0 \quad i \neq N_S \quad (22)$$

$$\sum_{ij \in S_{L_i}} [G_{ij}(f_i e_j - e_i f_j) - B_{ij}(e_i e_j + f_i f_j)] + \sum_{ij \in S_{T_i}} Q_{Tij} + \lambda_{Q_i} Q_{\text{di}} - Q_{G_i} - Q_{C_i} + Q_{L_i} = 0 \quad (23)$$

其中:  $S_{L_i}$  为与节点  $i$  相连的常规支路集合;  $S_{T_i}$  为与节点  $i$  相连的有载调压支路集合;  $n_B$  为系统原有的节点数;  $\lambda_{P_i}=1$  表示节点  $i$  和整流器相连,  $\lambda_{P_i}=-1$  表示节点  $i$  和逆变器相连,  $\lambda_{P_i}=0$  表示节点  $i$  没有和换流器相连;  $\lambda_{Q_i}=1$  表示节点  $i$  和换流器相连,  $\lambda_{Q_i}=0$  表示节点  $i$  没有和换流器相连;  $P_{G_i}$  和  $Q_{G_i}$  为节点  $i$  的发电机有功出力 and 无功出力;  $P_{L_i}$  和  $Q_{L_i}$  为节点  $i$  的有功负荷和无功负荷;  $Q_{C_i}$  为节点  $i$  的并联无功补偿出力;  $P_{Tij}$  和  $Q_{Tij}$  为 LTC 支路的有功功率和无功功率, 如果节点  $i$  为非标准侧节点,  $P_{Tij}$  和  $Q_{Tij}$  按式(1)、式(2)来计算, 如果节点  $i$  为标准侧节点,  $P_{Tij}$  和  $Q_{Tij}$  按式(3)、式(4)来计算。

基于以上对 LTC 支路和换流器的处理, 本文以各个节点(包括 LTC 虚拟节点)的实部、虚部、发电机无功出力、并联无功补偿出力、有载调压变比作为交流系统优化变量; 以和换流器支路对应的直流电压、直流电流、换流器控制角的余弦、换流变压器变比、虚拟节点电压幅值、交流节点电压幅值、交流电流幅值和交流电流实部、电流虚部作为直流系统侧优化变量, 以平衡节点注入有功最小为目标函数, 建立以下的交直流混合系统无功优化模型。

### 2.1 目标函数

本文以平衡节点注入有功  $P_{N_S}$  最小为目标函数, 当系统其他节点注入有功不变时, 平衡节点注入有功的变化等于系统有功损耗的变化。假设平衡节点没有和 LTC 支路或换流器相连接, 则  $P_{N_S}$  可表示为

$$P_{N_S} = \sum_{ij \in S_{L_i}} [G_{ij}(e_i e_j + f_i f_j) + B_{ij}(f_i e_j - e_i f_j)] \quad (24)$$

### 2.2 等式约束

等式约束包括交流 LTC 电压转换方程式(5)、式(6)、直流方程式(11)、式(12)和式(15)、式(19)、坐标耦合方程式(20)、式(21), 交直流系统的节点功率平衡方程等。交直流混合系统的节点功率平衡方程是把式(13)、式(14)代入式(22)、式(23)后, 消去变量  $P_{\text{di}}$  和  $Q_{\text{di}}$  而形成的。

### 2.3 不等式约束

不等式约束包括节点电压幅值、发电机有功出力、发电机无功出力、并联无功补偿出力、LTC 变比、直流电压、直流电流、直流功率、换流器吸收的无功功率、换流器控制角的余弦和换流变压器变比等, 它们表示为

$$(V_i^{\min})^2 / 2 \leq V_i^2 / 2 \leq (V_i^{\max})^2 / 2 \quad i = 1, \dots, n_B \quad (25)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad i = 1, \dots, n_G \quad (26)$$

$$Q_{Ci}^{\min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci}^{\max} \quad i = 1, \dots, n_C \quad (27)$$

$$t_i^{\min} \leq t_i \leq t_i^{\max} \quad i = 1, \dots, n_T \quad (28)$$

$$V_{di}^{\min} \leq V_{di} \leq V_{di}^{\max} \quad i = 1, \dots, n_d \quad (29)$$

$$I_{di}^{\min} \leq I_{di} \leq I_{di}^{\max} \quad i = 1, \dots, n_d \quad (30)$$

$$P_{di}^{\min} \leq P_{di} \leq P_{di}^{\max} \quad i = 1, \dots, n_d \quad (31)$$

$$Q_{di} > 0 \quad i = 1, \dots, n_d \quad (32)$$

$$\cos \theta_{di}^{\min} \leq \cos \theta_{di} \leq \cos \theta_{di}^{\max} \quad i = 1, \dots, n_d \quad (33)$$

$$k_{di}^{\min} \leq k_{di} \leq k_{di}^{\max} \quad i = 1, \dots, n_d \quad (34)$$

由上可见，所建的交直流系统优化模型的所有函数均是变量的二次函数，因此，它们对应的海森矩阵都是恒常矩阵，在基于PCPDIPM的整个无功优化过程中只计算一次，从而加速了整个优化过程；但由于优化变量和等式约束个数的增加，从而增加了修正方程的求解时间；但后面将证明采用列近似最小度法(Column Approximate Minimum Degree, COLAMD)算法对修正方程的系数矩阵进行节点优化编号，导致求解修正方程所增加的时间将小于形成系数矩阵所节省的时间，从而使优化总时间小于传统模型优化的总时间(关于PCPDIPM的介绍详见文献[7-8]，这里将不再赘述)。

### 3 算例仿真

本文在奔腾2.1(2 GB内存)，操作系统为WINDOWS Vista环境下，采用Matlab7语言对三个测试系统建立新模型(Mod1)和常规模型(Mod2)进行编程仿真校验。对于三个测试系统，直流电压的范围取为0.9~1.1 pu，直流电流的范围取为0.5~2 pu；控制角范围取为15~25°，整流变压器的变比的范围取为0.85~1.15 pu，等效换相电阻取为0.039 pu，直流线路电阻0.013 pu。测试系统情况如下：

系统1：在IEEE30系统中，节点2、4、6之间的三条交流输电线被直流输电线替代，修改之后的IEEE30系统是一个包含三端直流输电网络的交直流混合电力系统。

系统2：在IEEE57系统中，节点8和9之间的交流输电线被直流输电线替代，修改之后的IEEE57系统是一个包含两端直流输电网络的交直流混合电力系统。

系统3：在IEEE118系统中，节点26、30之间和节点80、77之间的两条交流输电线被直流输电线替代，修改之后的IEEE118系统是一个包含两条输电网络的交直流混合电力系统。

表1显示了所提模型与传统模型在一次迭代时

形成修正方程系数矩阵和求解修正方程所需要的时间，可以看出，所提模型在一次迭代时形成修正方程系数矩阵所需要的时间比常规模型少，这是因为：由于所提模型是二次模型，其目标函数，等式约束和不等式约束相对应的各个海森矩阵是恒常矩阵，在整个迭代过程中只需要计算一次，这大大缩短了形成修正方程系数矩阵所需要的时间；但对传统模型而言，由于交流LTC支路和直流系统的影响，其模型是阶函数，对应的各个海森矩阵在每一次迭代过程中都需要更新，因此增加了形成修正方程系数矩阵所需要的时间。在求解修正方程时，所提模型需要的时间比常规模型有所增加，这是因为在交流LTC支路和直流侧换流器支路引入相应优化变量，这导致优化变量，等式约束和拉格朗日乘子均增加了 $2n_T + 5n_d$ ，从而增加了修正方程系数矩阵的阶数，导致求解修正方程所需要的时间有所增加，但COLAMD算法更有效地减少求解所提模型牛顿方程所增加的时间。从表1可以看出，对于所提模型而言，形成修正方程系数矩阵所节省的时间大于求解修正方程所增加的时间。

表1 两个模型比较

Table 1 Comparison between two models

系统名称	系数矩阵形成时间/s		修正方程求解时间/s	
	Mod1	Mod2	Mod1	Mod2
IEEE30	3.3894e-004	6.3961e-004	0.004 9	0.004 8
IEEE57	0.001 1	0.001 5	0.007 9	0.007 7
IEEE118	0.004 0	0.005 1	0.010 7	0.010 0

表2显示了用两种模型对测试系统求解无功优化问题所需要的总时间、迭代次数和最优值，总时间包括形成海森矩阵、雅可比矩阵、系数矩阵的时间和求解牛顿方程所需要的时间。通过对三个节点系统仿真得出，所提模型需要的总时间比传统模型少，系统规模愈大，节省的时间愈多，这是由于二次新模型在形成修正方程系数矩阵时节省了大量时间。最重要的是，两种模型都有相同的最优值，所提模型需要的迭代次数相对要少一些。

表2 优化总时间、迭代次数和优化结果

Table 2 Times, iterations and optimal result

系统名称	总时间		迭代次数		最优值
	Mod1	Mod2	Mod1	Mod2	
IEEE30	0.117	0.194	13	13	0.282 6
IEEE57	0.243	0.405	10	11	4.271 9
IEEE118	0.826	1.107	12	13	5.089 4

补偿间隙反映了算法的收敛特性，是判断新模型是否有最优解的重要参数。对于一个模型如果有

最优解, 补偿间隙在前几步迭代应单调和快速地接近于零。为了更好地揭示新模型的收敛特性, 表3列出了IEEE30、IEEE 57和 IEEE118三个交直流系统在迭代过程中补偿间隙的变化, 仿真结果显示两种模型经过几步迭代补偿间隙单调和快速地衰减到零, 这证明它们有相同的收敛特性, 但新模型迭代次数要少一些。

表3 补偿间隙的迭代过程

Table 3 Change of complementary gap with iteration

迭代 次数	IEEE30		IEEE57		IEEE118	
	Mod1	Mod2	Mod1	Mod2	Mod1	Mod2
1	13.449 6	13.449 6	24.811 2	24.811 2	214.879	214.879
2	3.307 9	3.307 9	12.996 7	12.999 7	152.515	152.411
3	1.472 4	1.472 3	4.912 3	4.923 5	9.052 9	11.500 4
4	0.389 3	0.385 2	1.213 8	1.153 4	4	6.281 1
5	0.057 8	0.057	0.351 1	0.334	1.273 7	1.548 4
6	0.015 7	0.015 3	0.082 2	0.089 5	0.275 8	0.425 4
7	0.004 4	0.004 2	0.023 2	0.03	0.054 7	0.093 2
8	0.001 3	0.001 2	0.002 8	0.002 9	0.008 5	0.016 9
9	0.000 3	0.000 3	0.000 2	0.000 3	0.001 2	0.003 7
10	0.000 1	0.000 1	0	0.000 1	0.000 1	0.000 7
11	0	0		0	0	0.000 1
12	0	0			0	0
13	0	0				0

#### 4 结论

本文在交流侧有载可调变压器支路模型中引进虚拟节点, 并通过该虚拟节点的电压变量来表示有载可调变压器支路功率方程, 去除 LTC 支路变比这个变量。对于直流系统, 在换流变压器的理想变压器和换流阻抗之间引入一个虚拟节点, 虚拟节点电压幅值等一些变量被用来表示换流器支路方程; 耦合方程把不同坐标系下的方程耦合到一起, 由此建立了交直流混合系统无功优化问题的二阶新模型。在基于预测-校正原对偶内点法优化过程中, 该模型的海森矩阵是恒常矩阵, 在整个优化过程中只需要计算一次, 这样缩短了内点法的计算机消耗总时间。利用 COLAMD 算法对牛顿方程的系数矩阵进行节点优化排序, 以降低求解修正方程所需要的时间。算例结果表明: 本文所提模型与传统模型相比有相同的优化结果, 大大提高了计算速度。

#### 参考文献

[1] 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 Hua-qiang, 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.

[2] 姚煜, 蔡燕春. 离散粒子群与内点法结合的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 48-52. YAO Yu, CAI Yan-chun. A hybrid strategy based on DPSO and IPM for optimal reactive power flow[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 48-52.

[3] 罗毅, 多靖赟. 基于免疫记忆克隆选择算法的多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 65-70. LUO Yi, DUO Jing-yun. Multi-objective reactive power optimization based on immune memory colonial selection algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 65-70.

[4] 程军照, 李澍森, 程强. 一种无功优化预测校正内点算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 152-157. CHENG Jun-zhao, LI Shu-sen, CHENG Qiang. A predictor-corrector interior point method for optimal reactive power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 152-157.

[5] 熊宁, 张魏, 黄金海, 等. 基于约束松弛变量策略的中心校正内点法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 20-25. XIONG Ning, ZHANG Wei, HUANG Jin-hai, et al. Centrality correction interior point method based on constrained slack variables strategy[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 20-25.

[6] 刘沛津, 谷立臣, 韩行. 基于内点法与改进遗传法的无功规划优化混合算法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(17): 56-59. LIU Pei-jin, GU Li-chen, HAN Xing. Reactive power planning based on IPM and improved GA hybrid method[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(17): 56-59.

[7] TORRES G L, QUINTANA V H. An interior-point method for nonlinear optimal power flow using voltage rectangular coordinates[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(4): 1211-1218.

[8] 余娟, 颜伟, 徐国禹, 等. 基于预测-校正原对偶内点法的无功优化新模型[J]. 中国电机工程学报, 2005,

25(11): 146-151.

YU Juan, YAN Wei, XU Guo-yu, et al. A new model of reactive optimization based on predictor corrector primal dual interior point method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 146-151.

- [9] 简金宝, 杨林峰, 全然. 基于改进多中心校正解耦内点法的动态最优潮流并行算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 232-241.

JIAN Jin-bao, YANG Lin-feng, QUAN Ran. Parallel algorithm of dynamic optimal power flow based on improved multiple centrality corrections decoupling interior point method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 232-241.

- [10] KALAM A, HAQUE M Z. A new version of exact decoupled second order AC-DC load flow in rectangular

coordinates[C] // Proceedings of the IEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, Hong Kong, December, 1993: 262-267.

---

收稿日期: 2013-03-16; 修回日期: 2013-05-09

作者简介:

聂永辉(1970-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 从事电力系统运行与控制方面的研究工作; E-mail: yonghui\_n@yahoo.com.cn

李天云(1945-), 男, 教授, 从事自动控制理论、信号处理、非线性系统理论的教学及其在电力系统中的应用研究工作;

刘凤兰(1969-), 女, 高级教师, 从事数学优化算法方面的研究工作。