

内点法在计及 UPFC 无功/电压优化中的应用

黄若霖

(福州电业局, 福建 福州 350003)

摘要: 以统一潮流控制器(UPFC)为代表的灵活交流输电系统(FACTS)技术可以实现传输功率的合理分布、优化系统资源, 提高系统的稳定性和可靠性。基于内点优化方法, 提出了计及 UPFC 的无功优化模型, 以系统网损最小为目标函数, 采用 UPFC 电压源模型, 将其作用等效为一系列电压和功率的约束, 直接放到内点法的约束中, 在不同的负荷运行方式下进行了优化分析。用 IEEE-30 节点系统进行了测试, 引入 UPFC 后系数矩阵的维数会有所增加, 但不会影响其收敛性。结果表明该方法是可行的、有效的, 取得了很好的效果。

关键词: 无功优化; 内点法; 统一潮流控制器; 灵活交流输电系统

The application of interior point method in reactive power /voltage optimization with UPFCS

HUANG Ruo-lin

(Fuzhou Electric Power Industry Bureau, Fuzhou 350003, China)

Abstract: The technique of Flexible AC transmission system(FACTS), especially unified power flow controller(UPFC), could be used to realize the reasonable distribution of power flow and optimization of system resources, improve the stability and reliability of the system. This paper proposes a model for reactive power optimization with UPFC. It minimizes the loss of the system, adopts the UPFC voltage source model and transforms their effect into a series of restricts of voltage and power, which are analyzed in different load operational modes based Interior Point Method. The tests of IEEE-30 bus indicate that the proposed method is effective and feasible.

Key words: reactive power optimization; interior point algorithm; unified power flow controller(UPFC); flexible AC transmission systems(FACTS)

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)03-0015-04

0 引言

电力系统无功优化, 是根据电网的实际情况, 在满足安全运行约束的前提下, 利用现有的无功调节手段, 使系统无功潮流达到最优分布, 以减少有功损耗, 提高电压质量的目的。它是实现电力系统安全和经济运行的重要手段^[1]。长期以来, 国内外的很多专家、学者对此进行了大量的研究和探索工作, 尝试了各种优化模型, 并将各种优化算法应用于这一领域, 都取得了丰硕成果。

灵活交流输电系统^[2](FACTS)的概念诞生于20世纪80年代末期, 它的出现对电力系统的安全、可靠、经济和优质运行提供了有效的手段。其主要元件包括: 统一潮流控制器(UPFC)、可控硅串联补偿器(TCSC)、可控移相器(TCPC)、静止无功补偿器

(SVC)^[3]等等, FACTS装置可以根据需要迅速改变影响电力系统潮流分布的三个主要电气参数——电压、线路阻抗和相移。其中, UPFC由于集串并联补偿、移相等功能为一体, 受到了研究人员的普遍关注^[4]。因此, 开展计及UPFC的无功优化研究具有重要意义。

1 无功优化中的UPFC模型

目前已经提出来的 UPFC 稳态等值模型有多种, 如阻抗模型、节点等效注入功率模型及通用的电压源模型^[5]。由于 UPFC 在稳态运行时主要作用是控制电压和潮流分布, 因此本文采用 UPFC 电压源模型, 该模型由一个串联和并联的电压源及等效电抗组成。若有线路 k-m, 在 k 节点安装 UPFC 元件, 其等值模型如图 1 所示。

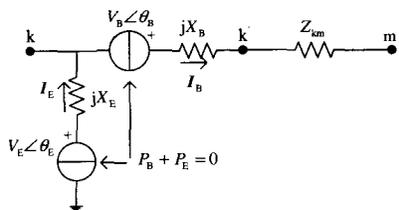


图 1 UPFC 及其安装线路的等值模型

Fig.1 Equivalent circuit model of the line with UPFC

注意到图 1 中有等式约束 $P_B + P_E = 0$ ，意味着 UPFC 和系统并没有有功功率的交流。其中， P_B 和 P_E 分别为电压源有功输出。因此，这两个电压源的运行是相互影响的。参数 X_E , X_B 和 Z_{km} 分别为两个电压源的内电抗和线路的阻抗。

线路 k-m 的首端和末端潮流公式如下：

$$\begin{aligned} S_{km} &= V_k \cdot I_{km}^* \\ S_{mk} &= V_m \cdot I_{mk}^* \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{其中: } I_{km} = -I_{mk} = \frac{V_k + V_B - V_m}{Z_{km} + jX_B} \quad (2)$$

式(1)中： V_k 、 V_m 分别为节点 k 和 m 的复电压； I_{km} 为线路从节点 k 到 m 的复电流， I_{mk} 为线路从节点 m 到 k 的复电流；式(2)中： V_B 、 V_E 分别为两个电压源的复电压，均为 UPFC 的变量。

两个电压源的输出功率计算公式如下：

$$\begin{aligned} S_B &= V_B \cdot I_B^* \\ S_E &= V_E \cdot I_E^* \end{aligned} \quad (3)$$

其中，

$$I_B = I_{km} = \frac{V_k + V_E - V_m}{Z_{km} + jX_B}; \quad I_E = \frac{V_E - V_k}{jX_E} \quad (4)$$

考虑到 UPFC 装置本身的约束，包括串并联电压源的电压幅值和输出功率。

$$\begin{aligned} V_E &< V_{E,max} \\ V_B &< V_{B,max} \\ S_E &< S_{E,max} \\ S_B &< S_{B,max} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中： $V_{E,max}$ 和 $V_{B,max}$ 分别为两个电压源电压的

上限； $S_{E,max}$ 和 $S_{B,max}$ 分别为两个电压源的功率输出上限。

2 计及 UPFC 的无功优化模型

以系统有功网损最小为目标函数，控制变量包括发电机无功出力、无功补偿设备、可调变压器档位和 UPFC 的控制等，因此，模型可以描述如下：

$$\begin{aligned} \min & \left(f(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^n V_i \sum_{j \in I} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \right) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j \in I} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) + P_{Fi} = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j \in I} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + Q_{Fi} = 0 \\ P_B + P_E = 0 \\ x_1 \leq x_1 \leq \bar{x}_1 \\ x_2 \leq x_2 \leq \bar{x}_2 \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中：等式约束分别为有功、无功潮流平衡方程和 UPFC 自身功率平衡方程，对于未装设 UPFC 的节点， P_{Fi} 、 Q_{Fi} 均为零，即没有附加的有功功率和无功功率注入节点 i ； $x_1 = [Q_C, T_B]$ ， Q_C 为可投切电容器或电抗器的无功出力列向量， T_B 为可调变压器的变比列向量，均为离散特性的向量， $x_1 \in R^{(p)}$ ； $x_2 = [Q_G, \lambda_F, V]$ ， Q_G 为发电机或静止无功补偿器的无功出力列向量， λ_F 为 UPFC 串并联电压源等控制变量的列向量， V 为所有节点电压幅值构成的列向量，均为连续变化的向量， $x_2 \in R^{(q)}$ ； $x_3 = [P_{GN}, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N-1}]$ ，为平衡节点的有功出力和除平衡节点外的其他节点电压相角构成的列向量， $x_3 \in R^{(N)}$ ， N 为系统节点数。

3 原对偶内点法进行优化

自从 1984 年 Karmarkar 提出内点法以来，许多学者对该算法进行了广泛深入的研究。内点法本质上是对数障碍函数法、拉格朗日函数和牛顿法解方程三者的结合，从初始内点出发，沿着最速下降方向，从可行域内部直接走向最优解。原-对偶内点法^[6,7]是在保持解的原始可行性和对偶可行性的同时，沿一条原-对偶路径寻到最优解，并在此过程中能始终维持原始解和对偶解的可行性，在处理不等式约束

以及迭代收敛方面不受系统规模的影响, 显现出较明显的优势。

计及统一潮流控制器的无功优化问题可以表达为一个如下非线性规划问题:

$$\begin{aligned} \min & f(\mathbf{x}) \\ \text{s. t. } & \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \quad R^n \rightarrow R^m \\ & \underline{\mathbf{g}} \leq \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \bar{\mathbf{g}} \quad R^n \rightarrow R^r \end{aligned} \quad (7)$$

引入松弛变量向量 $(\mathbf{l}, \mathbf{u}) \in R^r$, 将式(7)转化为:

$$\begin{aligned} \min & f(\mathbf{x}) \\ \text{s. t. } & \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \\ & \mathbf{g}(\mathbf{x}) - \underline{\mathbf{g}} - \mathbf{l} = 0 \\ & \mathbf{g}(\mathbf{x}) - \bar{\mathbf{g}} + \mathbf{u} = 0 \\ & (\mathbf{l}, \mathbf{u})^3 \geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

引入障碍函数项, 并定义问题(8)的拉格朗日函数, 则有:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{l}, \mathbf{u}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) = & f(\mathbf{x}) - \mu \left(\sum_{i=1}^r \ln l_i + \sum_{i=1}^r \ln u_i \right) - \mathbf{y}^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) - \\ & \mathbf{z}^T (\mathbf{g}(\mathbf{x}) - \underline{\mathbf{g}} - \mathbf{l}) - \mathbf{w}^T (\mathbf{g}(\mathbf{x}) - \bar{\mathbf{g}} + \mathbf{u}) \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中: $\mathbf{y} \in R^m, (\mathbf{y}, \mathbf{w}) \in R^r$ 为拉格朗日乘子; $\mu > 0$ 为障碍因子。

根据摄动库恩-图克 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 一阶最优条件可得: (为书写方便, 以下用 L 代替 $L(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{l}, \mathbf{u}, \mathbf{z}, \mathbf{w})$):

$$\begin{cases} \mathbf{L}_x \equiv \nabla f(\mathbf{x}) - \nabla \mathbf{h}(\mathbf{x}) \mathbf{y} - \nabla \mathbf{g}(\mathbf{x})(\mathbf{z} + \mathbf{w}) = 0 & \mathbf{L}_x \in R^n \\ \mathbf{L}_y \equiv \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 & \mathbf{L}_y \in R^m \\ \mathbf{L}_z \equiv \mathbf{g}(\mathbf{x}) - \underline{\mathbf{g}} - \mathbf{l} = 0 & \mathbf{L}_z \in R^r \\ \mathbf{L}_w \equiv \mathbf{g}(\mathbf{x}) - \bar{\mathbf{g}} + \mathbf{u} = 0 & \mathbf{L}_w \in R^r \\ \mathbf{L}_l^\mu \equiv \mathbf{L} \mathbf{z} \mathbf{e} - \mu \mathbf{e} = 0 & \mathbf{L}_l^\mu \in R^r \\ \mathbf{L}_u^\mu \equiv \mathbf{U} \mathbf{w} \mathbf{e} + \mu \mathbf{e} = 0 & \mathbf{L}_u^\mu \in R^r \\ (\mathbf{l}, \mathbf{u}) \geq 0, \mathbf{y} \neq 0, \mathbf{z} \geq 0, \mathbf{w} \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: $(\mathbf{L}, \mathbf{U}, \mathbf{Z}, \mathbf{W}) \in R^{(r \times r)}$ 是对角元素分别为 l_i, u_i, z_i, w_i 的对角阵; $\mathbf{e} = [1, \dots, 1] \in R^r$ 为单位列向量。

用 Newton 法求解摄动 KKT 方程(10), 修正方程为:

$$\begin{cases} (\nabla^2 \mathbf{h}(\mathbf{x}) \mathbf{y} + \nabla^2 \mathbf{g}(\mathbf{x})(\mathbf{z} + \mathbf{w}) - \nabla^2 f(\mathbf{x})) \Delta \mathbf{x} + \\ \nabla \mathbf{h}(\mathbf{x}) \Delta \mathbf{y} + \nabla \mathbf{g}(\mathbf{x})(\Delta \mathbf{z} + \Delta \mathbf{w}) = \mathbf{L}_{x0} \\ \nabla \mathbf{h}(\mathbf{x})^T \Delta \mathbf{x} = -\mathbf{L}_{y0} \\ \nabla \mathbf{g}(\mathbf{x})^T \Delta \mathbf{x} - \Delta \mathbf{l} = -\mathbf{L}_{z0} \\ \nabla \mathbf{g}(\mathbf{x})^T \Delta \mathbf{x} + \Delta \mathbf{u} = -\mathbf{L}_{w0} \\ \mathbf{Z} \Delta \mathbf{l} + \mathbf{L} \Delta \mathbf{z} = -\mathbf{L}_{l0}^\mu \\ \mathbf{W} \Delta \mathbf{u} + \mathbf{U} \Delta \mathbf{w} = -\mathbf{L}_{u0}^\mu \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: $(\mathbf{L}_{x0}, \mathbf{L}_{y0}, \mathbf{L}_{z0}, \mathbf{L}_{w0}, \mathbf{L}_{l0}^\mu, \mathbf{L}_{u0}^\mu)$ 为摄动 KKT 方程在展开点的值; $\nabla^2 f(\mathbf{x}), \nabla^2 \mathbf{h}(\mathbf{x}), \nabla^2 \mathbf{g}(\mathbf{x})$ 分别为 $f(\mathbf{x}), \mathbf{h}(\mathbf{x}), \mathbf{g}(\mathbf{x})$ 的 Hessian 矩阵。

从式(11)可以看出: 摄动方程的系数矩阵为 $(4r + m + n) \times (4r + m + n)$ 的方阵, 因此求解该方程的计算量十分庞大, 为简化计算, 对方程(11)进行行列交换并分解, 形成两个不完全解耦的子方程(12)和(13)。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{L}^{-1} \mathbf{Z} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{I} & \mathbf{U}^{-1} \mathbf{W} \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{z} \\ \Delta \mathbf{l} \\ \Delta \mathbf{w} \\ \Delta \mathbf{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{L}^{-1} \mathbf{L}_{l0}^\mu \\ \mathbf{L}_z + \nabla \mathbf{g}(\mathbf{x})^T \Delta \mathbf{x} \\ -\mathbf{U}^{-1} \mathbf{L}_{u0}^\mu \\ -\mathbf{L}_w - \nabla \mathbf{g}(\mathbf{x})^T \Delta \mathbf{x} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H} & \nabla \mathbf{h}(\mathbf{x}) \\ \nabla \mathbf{h}(\mathbf{x})^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_x \\ -\mathbf{L}_y \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中:

$$\begin{cases} \mathbf{L}_x' = \mathbf{L}_x + \nabla \mathbf{g}(\mathbf{x}) [\mathbf{L}^{-1} (\mathbf{L}_l^\mu + \mathbf{Z} \mathbf{L}_z) + \mathbf{U}^{-1} (\mathbf{L}_u^\mu - \mathbf{W} \mathbf{L}_w)] \\ \mathbf{H}' = \nabla^2 \mathbf{h}(\mathbf{x}) \mathbf{y} + \nabla^2 \mathbf{g}(\mathbf{x})(\mathbf{z} + \mathbf{w}) - \nabla^2 f(\mathbf{x}) - \nabla \mathbf{g}(\mathbf{x}) \\ [\mathbf{L}^{-1} \mathbf{Z} - \mathbf{U}^{-1} \mathbf{W}] \nabla \mathbf{g}(\mathbf{x})^T \end{cases}$$

方程(12)的系数矩阵为 $(m + n) \times (m + n)$ 阶, 方程(13)的系数矩阵为 $4r \times 4r$ 阶, 都小于方程(11)的阶数, 计算量大大减小。

4 算例分析及结果

为验证本文所提方法的有效性, 对 IEEE-30 节点系统进行了仿真分析。该系统包括 6 台发电机, 4 台变压器, 6 个无功补偿装置, 均可参与优化调节。UPFC 元件安装在由模态分析技术^[8]确定的关键线路 4-6 靠近节点 4 处。系统所有节点电压上、下限分别取 1.07 和 0.93, 电压幅值初始化为 1.0, 相角初始化为 0.0。内点法初值取为: x^0 取对应变量的上下

限平均值, $l^0 = h(x^0) - \underline{h}$, $u^0 = \bar{h} - h(x^0)$, $y_i^0 = 1$, $z_i^0 = 0.8/l_i^0$, $w_i^0 = -0.8/u_i^0$, $\mu^0 = 0.01$; 收敛判据: $\rho \leq 10^{-6}$ 。将离散变量 $x_j = [Q_C, T_B]$ 当作连续变量处理, 优化结束后采用靠拢式取整, 然后再用潮流进行校验, 最后给出最优的控制方案。

UPFC可控电压源的幅度和相角均可在一定范围内调节, 其中幅值的调节要受到自身容量等因素的限制, 而相角可在 $0 \sim 2\pi$ 之间任意变化, 本文中UPFC参数及其约束条件的选取见表1。UPFC元件控制变量的初值设置^[9]如下: 假设初始时UPFC没有运行, 也就是说, 并联电压源初始化为1.0, 即 $V_E = 1.0, \theta_E = 0.0$; 串联电压源初始化为0.0, 即 $V_B = 0.0, \theta_B = 0.0$ 。程序用C++语言实现, 在正常运行方式和重负荷运行方式两种情况下进行了优化分析, 矩阵采用十字交叉链表稀疏技术存储, 大大提高了计算速度, 结果见表2, 并给出了最优控制方案下UPFC的参数值, 见表3。

表1 系统所含UPFC元件的参数

Tab.1 Parameters and constraints of UPFC in IEEE-30

X_E	X_B	$V_{B,max}$	$V_{E,max}$	$S_{E,max}$	$S_{B,max}$
0.05	0.05	0.40	1.10	0.44	0.44

表2 30节点系统无功优化计算结果

Tab.2 The result after optimization of 30-bus system

	有功网损/MW		最低电压/pu	
	未装设	计及	未装设	计及
	UPFC	UPFC后	UPFC	UPFC后
正常运行方式	81.98	81.03	0.9533	0.9624
重负荷运行方式	87.78	87.32	0.9362	0.9518

结果分析: 引入UPFC后, 内点法求解的系数矩阵会增加, 仿真发现不会影响其收敛性。从表2可以看出, 无论在正常运行方式还是重负荷运行方式下, 计及UPFC无功优化后, 网损都有所下降, 电压质量也进一步提高, 表明引入新技术后系统可供开发的空間还是有的。

结果分析: 从表3可以看出, 重负荷时系统电压偏低、网损比较大, UPFC串并联电压源都需要向上调节, 但从文献[9]可以看出UPFC没有发挥至最佳, 估计在电力市场机制下重负荷时装设在联络线上其功效会更好。

表3 最优控制方案下UPFC的参数值

Tab.3 Parameters of UPFC under optimal control

参数	V_B	$\theta_B / (^\circ)$	V_E	$\theta_E / (^\circ)$
正常运行方式下控制值	0.0097	62.31	0.172	164.28
重负荷运行方式下控制值	0.232	87.25	0.251	153.36

5 结论

本文提出了计及统一潮流控制器的无功优化的模型, 将UPFC元件的作用等效为一系列电压和功率的约束, 利用内点法求解, 可以方便地考虑其对系统状态的影响, 以IEEE30节点系统为例, 在不同的负荷运行方式下进行了优化分析, 并给出了最优控制方案下UPFC的参数值。

对装设UPFC和不装设UPFC元件两种情况下无功优化的结果进行了比较。装设UPFC后, 降低了系统网损, 改善了电压质量。测试表明, 该方法是可行的、有效的, 取得了很好的效果。

参考文献

- [1] 丁晓群, 邓勇, 黄伟, 等. 基于遗传算法的无功优化在福建电网的实用化改进[J]. 电网技术, 2004, 28(16): 44-47.
DING Xiao-qun, DENG Yong, HUANG Wei, et al. Practical Improvement of Reactive Power Optimization Based on Genetic Algorithm in Fujian Power System[J]. Power System Technology, 2004, 28(16): 44-47.
- [2] 李国庆, 赵钰婷, 王利猛. 计及统一潮流控制器的可用输电能力的计算[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 44-49.
LI Guo-qing, ZHAO Yu-ting, WANG Li-meng. Available Transfer Capability Calculation with Unified Power Flow Controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 14(9): 44-49.
- [3] 鞠儒生, 陈宝贤, 邱晓刚. UPFC控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 60-65, 70.
JU Ru-sheng, CHEN Bao-xian, QIU Xiao-gang. Basic Control of Unified Power Flow Controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 60-65, 70.
- [4] 孙国强, 卫志农, 李阳林, 等. 计及统一潮流控制器的电力系统状态估计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 63-67.
SUN Guo-qiang, WEI Zhi-nong, LI Yang-lin, et al. Power System State Estimation with UPFC Considered[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 63-67.
- [5] 张小平. 潮流和最优潮流分析中FACTS控制器的建模[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(16): 22-29.

(下转第22页 continued on page 22)

构及其属性数据, 进行计算。这样, 在拓扑分析模块和网损计算模块各自独立的基础上, 实现了二者在功能上的紧密结合。

4 结束语

基于 MapX 的配电网理论线损计算模块, 已成功嵌入到 DMS 系统中, 成为 DMS 系统的重要组成部分。本系统在前推回代算法的原理基础上, 建立了一个更适合计算机编程计算的算法, 并且借助现有的 MapX 平台将该算法可视化, 由于采用了可视化技术, 大大提高了软件的实用性, 不需人工干预, 达到了高度的智能化。

参考文献

- [1] 杨学伟, 运志涛, 张根保, 等. 基于 GIS 的可视化配电网理论线损计算子系统[J]. 现代电力, 2003, 20(1): 37-38.
YANG Xue-wei, ZHANG Gen-bao, YUN Zhi-tao, et al. Visualized Line-Loss Calculation Subsystem for Distribution Net Based on GIS[J]. Modern Electric Power, 2003, 20(1): 37-38.
- [2] 龚健雅. GIS 基础[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
GONG Jian-ya. The Fundmation of GIS[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [3] 陈立平, 李德军, 刘媛杰. 基于 GIS 的配电网理论线损系统的应用[J]. 微计算机信息, 2007, 23(71): 234-246.
CHEN Li-ping, LI De-jun, LIU Yuan-jie. Application of Management System Based on GIS for Theoretic Line Loss of Distribution Net[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(71): 234-246.
- [4] 姜建国, 王秀芳, 王金龙, 等. 基于行业标准的油气田电网线损率计算方法[J]. 大庆石油学院学报, 2006, 30(5): 85-95.
JIANG Jian-guo, WANG Xiu-fang, WANG Jin-long, et al. Method for Calculating the Rate of Transmission Losses in Oil and Gas Fields' Electrical Power Network Based on Industry Standardization[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2006, 30(5): 85-95.
- [5] 丁心海, 罗毅芳, 刘巍, 等. 配电网线损理论计算的实用方法——改进迭代法[J]. 电网技术, 2000, 24(1): 39-42.
DING Xin-hai, LUO Yi-fang, LIU Wei, et al. A New Practical Method for Calculating Line Loss of Distribution Network——Improved Iteration Method[J]. Power System Technology, 2000, 24(1): 39-42.
- [6] 韦化, 李滨, 杭乃善, 等. 大规模水-火电力系统最优潮流的现代内点算法实现[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 13-18.
Wei Hua, Li Bin, Hang Naishan, et al. An Implementation of Interior Point Algorithm for Large-scale Hydro-thermal Optimal Power Flow Problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 13-18.
- [7] Mingbo Liu, Tao S K. An Extended Nonlinear Primal-dual Interior-point Algorithm for Reactive-power Optimization of Large-scale Power Systems with Discrete Control Variables[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4): 982-991.
- [8] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [9] 朱鹏程, 刘黎明, 刘小元, 等. 统一潮流控制器的分析与控制策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 45-51.
ZHU Peng-cheng, LIU Li-ming, LIU Xiao-yuan, et al. Analysis and Study on Control Strategy for UPFC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 45-51.

收稿日期: 2007-08-30; 修回日期: 2007-12-20

作者简介:

毕洪波(1979-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为油气田供配电系统优化、电力系统信息化等; E-mail: bihongbo@dqi.edu.cn

张玉波(1982-), 女, 硕士, 助教, 研究方向为电网优化、电力系统自动化等;

王金龙(1969-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为油气田供配电系统规划、信息化等。

收稿日期: 2007-09-13; 修回日期: 2007-11-22

作者简介:

黄若霖(1976-), 男, 工程师, 主要从事电力系统继电保护、变电站综合自动化以及电气设备故障诊断等领域的研究和维护工作。

(上接第 18 页 continued from page 18)