

含离散变量的大规模电力系统无功优化

石 韦, 韦 化, 白晓清

(广西大学 电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 针对实际电力系统的数学模型包含离散变量和连续变量的特点, 提出了一种精确求解电力系统无功优化的方法——内点分支定界法。通过把离散变量连续化, 采用原始对偶内点法在可行域内进行全局寻优, 结合广度优先遍历的分支定界法对离散变量进行归整处理等办法, 找到了比传统无功优化更加合理的全局最优解。为了解决大规模系统计算耗时的问题, 又提出了简化的分支定界法以加快求解速度。IEEE-118 和 IEEE-300 系统的计算结果表明: 所提出的算法对于求解大规模电力系统的无功优化问题是有效的。

关键词: 无功优化; 分支定界法; 原始对偶内点法

中图分类号: TM 761⁺.12

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)03-0041-04

0 引言

无功优化问题是电力系统电压稳定和经济运行的核心问题, 也是提高电力系统电压质量的重要措施。实际电力系统是复杂的非线性大规模系统, 其数学模型包含连续变量和离散变量。通常的方法是把离散变量处理成连续变量, 求出最优解之后, 就近取整。这样就很有可能使得归整之后的解不是最优解, 甚至是不可行解。精确求解无功优化的问题事实上是求解混合整数规划问题^[1-2]。这里采用原始对偶内点法结合分支定界法进行求解。

分支定界法^[3], 实质上是通过分支定界树的遍历, 逐步细分可行域, 对离散变量进行整数逼近, 从而找到整数规划的全局最优解。对树的遍历, 可分为深度优先遍历^[4]和广度优先遍历。现采用的是广度优先遍历法。

原始对偶内点法能有效地求解大规模电力系统的非线性规划^[5-6], 但是它还不能直接求解离散变量^[7], 因此尝试结合分支定界法来处理离散变量, 从而求解无功优化的全局最优解^[8]。

通过对 2 个大规模测试系统仿真计算说明该算法的有效性。另外, 对分支定界法进行简化得到了相对分支定界法较快速的次优解。

1 无功优化的数学模型

电力系统无功优化的严格数学模型是离散变量和连续变量共存的非线性混合整数规划模型。采用原始对偶内点法结合分支定界法求解无功优化, 将离散变量处理成连续变量后^[9], 再结合分支定界法对离散变量进行整数逼近, 达到精确求解的目的。

1.1 离散变量的表达

$$C_i = C_{oi} + C_{si} C_{ni} \quad i \in S_C$$
$$k_{ij} = k_{oi} + k_{si} k_{nij} \quad (i, j) \in S_T$$

通过上面的表达式, 可得到相应的补偿节点的电纳和变压器支路的变比。其中 C_{ni} 、 k_{nij} 分别为电容器或电抗器投入组数和变压器分接头档位, 即离散变量。 C_{oi} 、 k_{oi} 分别为补偿设备的电纳和可调变压器变比的初始值, C_{si} 、 k_{si} 分别为无功补偿设备投切组数的分级步长及可调变压器分接头档位的分级步长, S_C 、 S_T 分别为电容器、变压器的集合。

1.2 目标函数

选取平衡节点的有功出力最小为目标函数, 这等于系统的有功网损最小:

$$\min f = P_s$$

1.3 电力网络约束

电力网络约束是潮流方程, 为了求解方便, 采用包含变压器变比和无功补偿电容器显式表达的数学模型, 用直角坐标形式表示如下:

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j \in S/T_i} [e(e G_{ij} - f_j B_{ij}) + f_i(f_j G_{ij} + e B_{ij})] -$$
$$\sum_{(j,i) \in T_i^+} \{k_{ij}^2 (e^2 + f_i^2) g_j - k_{ij} [(e e + f_i f_j) g_j + (e f_i - e f_j) b_j]\} -$$
$$\sum_{(i,j) \in T_i} \{ (e^2 + f_i^2) g_j - k_{ij} [(e e + f_i f_j) g_j + (e f_i - e f_j) b_j] \} = 0$$
$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j \in S/T_i} [f_i(e G_{ij} - f_j B_{ij}) - e(f_j G_{ij} + e B_{ij})] -$$
$$\sum_{(j,i) \in T_i^+} \{ -k_{ij}^2 (e^2 + f_i^2) b_j - k_{ij} [(e e + f_i f_j) b_j - (e f_i - e f_j) g_j] \} -$$
$$\sum_{(i,j) \in T_i} \{ - (e^2 + f_i^2) b_j + k_{ij} [(e e + f_i f_j) b_j + (e f_i - e f_j) g_j] \} +$$
$$(e^2 + f_i^2) \sum_{i \in S_C} C_i = 0$$

$i = 1, 2, \dots, n$

式中 P_{Di} 和 Q_{Di} 为节点 i 的有功和无功负荷; P_{Gi} 和 Q_{Gi} 为节点 i 的有功和无功输出; g_j 和 b_j 为变压器支路 (i, j) 的电导和电纳; C_i 和 k_{ij} 为节点 i 的

电纳值和变压器支路(i, j)的变比值; S_i 为与节点 i 相邻节点的集合; S_C 为无功补偿电容器的集合; T_i 为与节点 i 相邻变压器节点集合; T_i^+ 为与节点 i 正向相邻变压器节点(即理想变压器连接 i 点)的集合; T_i^- 为与节点 i 反向相邻变压器节点(即理想变压器不连接 i 点)的集合。

1.4 安全运行约束

$$\begin{aligned} & \underline{P}_s \quad P_s \quad \bar{P}_s \\ & \underline{Q}_{Gi} \quad Q_{Gi} \quad \bar{Q}_{Gi} \quad i \in S_R \\ & \underline{U}_i^2 \quad (e_i^2 + f_i^2) \quad \bar{U}_i^2 \quad i = 1, 2, \dots, n \\ & \underline{P}_{ij} \quad P_{ij} \quad \bar{P}_{ij} \quad (i, j) \in S_L \\ & P_{ij} = (e_i^2 + f_i^2 - e_i e_j - f_i f_j) G_{ij} + (e_i f_j - e_j f_i) B_{ij} \\ & \underline{C}_{ni} \quad C_{ni} \quad \bar{C}_{ni} \quad i \in S_C \\ & \underline{k}_{nij} \quad k_{nij} \quad \bar{k}_{nij} \quad (i, j) \in S_T \end{aligned}$$

式中 e_i 和 f_i 为节点 i 的电压实部和虚部; U_i 为节点 i 的电压幅值; P_s 为平衡节点的有功出力; Q_{Gi} 为无功电源的无功出力; P_{ij} 为线路(i, j)上的有功功率传输; S_R 、 S_T 、 S_C 和 S_L 分别为无功源、变比可有载调整变压器、电容器和约束传输线路的集合; 上划线和下划线分别表示变量或函数的上、下界。

2 求解方法

为了精确求解无功优化问题, 采用原始对偶内点算法和分支定界法进行协同求解。下面简要叙述这 2 种方法。

2.1 原始对偶内点法

原始对偶内点法是现代内点算法中最优秀的算法, 并从理论上被证明具有多项式时间复杂性^[10], 当约束条件和变量数目增加时, 该算法的迭代次数随着系统规模的变化比较小、收敛速度快、精度高, 适合求解大规模非线性系统^[11-12]。

原始对偶内点法求解非线性规划问题的步骤, 可参考文献[13-14]。

2.2 分支定界法

分支定界法的基本思想是隐含枚举, 即对可行的组合方式枚举。它是从相应的最优解出发, 若此解不是整数则将原问题分解成 2 部分, 每部分增加新的约束, 压缩可行域, 逐步逼近最优整数解。下面简要介绍分支定界法的基础, 即分支、定界、剪支和收敛判据^[15]。

2.2.1 分支

分支是指通过引入线性松弛将原问题的可行解空间进行反复的分割使之成为越来越小的子问题可行解域。如图 1 所示, 若离散变量 d_i 没有求得整数解, 则根据 d_i 的整数部分进行分支, 把 d_i 可行域划分为 $d_i \leq l_i$ 以及 $d_i \geq l_i + 1$ 这 2 部分。即把 1 个父问题松

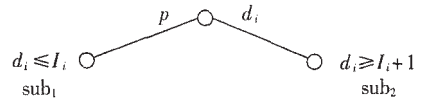


图 1 分支示意图

Fig.1 Sketch diagram of branches

弛成了 2 个子问题。其中 l_i 代表 d_i 的整数部分, p 表示父问题, sub_1 和 sub_2 表示 2 个新的松弛子问题, 且

$$\begin{aligned} & \text{sub}_1: \min f(x) \quad \text{sub}_2: \min f(x) \\ & \text{s.t. } h(x) = 0 \quad \text{s.t. } h(x) = 0 \\ & \underline{g} \quad g(x) \quad \bar{g} \quad \underline{g} \quad g(x) \quad \bar{g} \\ & \underline{x} \quad x \quad \bar{x} \quad \underline{x} \quad x \quad \bar{x} \\ & d_i \quad l_i \quad d_i \quad l_i + 1 \end{aligned}$$

2.2.2 定界

一次分支完毕后都应不断更新原问题的最小上界和最小下界。求出分支到目前为止的整数可行解的最小目标值, 即为当前的最小上界; 对未取得整数解的松弛子问题的目标值取最小者即为最小下界。

2.2.3 剪支

满足以下 3 条依据中的任意一条, 则可以在计算完一次分支的所有子问题之后剪支:

- 父问题不可行;
- 父问题已经取得整数解;
- 松弛的子问题的目标值大于或等于已得的最小上界。

对于大规模的电力系统, 离散变量很多, 每次分支时产生的子问题随着分支次数增加而剧增, 求解非常耗时, 必须通过适当的剪支来加快求解速度。

2.2.4 收敛判据

将所有子问题求解完毕后, 在已得到的整数可行解中取目标值最小的解为原问题的最优整数解。当取到最优值时, 原最小规划问题的最小上界值和最小下界值近似相等, 也可以作为收敛判据。

2.3 简化分支定界法

简化分支定界法是对分支定界法(下文称完全分支定界法)的一种简化, 其结合原始对偶内点法用于无功优化的算法流程与完全分支定界法相同, 但剪支依据较完全分支定界法(见 2.2.3 节)要增加一则, 即当离散变量未取到整数时, 按照分支原则对父问题进行分支处理, 得到 2 个新的松弛子问题, 比较这 2 个子问题的目标值, 选取目标值小的一个子问题作为下一次分支的父问题而删除另外一个目标值较大的子问题。

3 算法流程

基于无功优化的数学模型和求解方法, 用原始对偶内点法结合分支定界法协同求解无功优化, 下面归纳其算法流程。

步骤 1 读入测试系统的数据, 把离散的控制变量松弛为连续变量, 用原始对偶内点法求解无功优化的原问题。

步骤 2 判断是否取到可行解,若是,则原问题有解,否则无解。若有解,判断此解中的离散变量是否完全取到整数,若是,则输出最优解,否则把离散变量的上下界和初次求得的值放入待分支的矩阵 P,按照行向量存放信息。

步骤 3 设分支的最大次数 layerMax=500,分支次数 layer=1,将原松弛问题的目标值定为原问题的最小下界,并且给最小上界赋任意足够大的值。

步骤 4 判断待分支矩阵 P 是否为空矩阵,若是,则跳出主循环体。从整数可行解中取出目标值最小的子问题对应的解即为最优解。

步骤 5 否则进入判断子程序并且计算。对于矩阵 P,取出一行,设为 p_i , 代表一个父问题的离散变量的所有信息。由于电容器的投切直接改变系统的无功大小,而改变变压器分接头档位只改变系统的潮流分布,所以在变量分支次序上优先考虑电容器投切组数,再考虑变压器分接头档位。

步骤 6 判断是否所有电容器的投切组数已经达到整数。如果不是,再由分支原则把父问题分成 2 个子问题,合并可行域,判断该变量的上界和下界是否相等;若是,则找到该变量的一个整数解,松弛其他没有达到整数的变量,再用原始对偶内点法求解。如果有解,则把结果存入下一次待分支的矩阵 P_{tp} 中。

步骤 7 当所有的电容器的投切组数已达到整数,则同理判断变压器分接头档位。按照分支原则结合原始内点法求解该问题。若有解则把结果存入下一次待分支的矩阵 P_{tp} 。

步骤 8 当所有电容器的投切组数和变压器分接头档位都已经求得整数的时候,直接求解该子问题对应的目标值。并且把该整数解连同目标值一起记录到矩阵 P_{layer} 中。

步骤 9 把 P 对应 p_i 的行信息删除,更新 P。

步骤 10 从 P 中再取出一个子问题重复步骤 5。

步骤 11 当 P 矩阵为空的时候,表明已经完成一次分支的所有要求解的问题。更新原问题的最小下界和最小上界,按照剪支原则对 P_{tp} 矩阵进行剪支,更新 P_{tp} 。根据 P_{tp} 中信息合并 P_{tp} 中相同的子问题,更新 P_{tp} 。这时得到下一次要分支的父问题矩阵 P。重复步骤 4。

步骤 12 若 layer layerMax, 重复执行步骤 4 ~ 12, layer=layer+1; 否则结束。

4 仿真结果与讨论

为了验证所提算法求解无功优化问题的有效性,采用 Matlab 7.1 进行仿真计算。计算机的配置为: Pentium4 2.8 GHz 的 CPU, 512 M 的内存, Windows XP Professional 的操作系统。测试系统为 IEEE- 118 和 IEEE- 300, 基准功率均为 100 Mvar。

IEEE- 118 测试系统有 15 台电容器, 8 台可调变压器; IEEE- 300 测试系统有 14 台电容器, 107 台

可调变压器。每台电容器离散变量的取值上、下限为 5.0 和 0。可调变压器的分接头档位的分级步长为 5%, 变比的上、下限为 1.1 和 0.9。

表 1 和表 2 分别列出了用 4 种优化方法计算 IEEE- 118 和 IEEE- 300 系统时得到的结果。其中优化前和优化后分别对应没有进行优化和优化后的网络有功损耗; 简单归整法是在离散变量连续化后用原始对偶内点法求解, 将求解到的离散变量归整, 再进行一次潮流计算; 连续优化法是把离散变量连续化后用原始对偶内点法求解。

为了便于分析, 定义有功网损变化百分比为

$$L_P(\%) = \frac{P_{L0} - P_L}{P_{L0}} \times 100\%$$

式中 $L_P(\%)$ 表示有功网损变化百分比, 用于衡量优化方法使得网损下降的效果; P_{L0} 为优化前的网络有功损耗; P_L 为优化后的网络有功损耗。

当 P_{L0} 给定时, P_L 越小, $L_P(\%)$ 则越大, 说明优化效果越好。表 1 和表 2 中的 $L_P(\%)$ 分别对应优化后 IEEE- 118 和 IEEE- 300 测试系统的有功网损变化百分比。

表 1 IEEE- 118 系统优化结果
Tab.1 Optimized results of IEEE- 118 system

优化方法	$P_{L0}/p.u.$	$P_L/p.u.$	$L_P/\%$	N	t/s
本文方法	1.3431	1.1248	16.25	0	1506
连续优化	1.3431	1.1190	16.69	0	0.6149
简单归整	1.3431	1.2400	7.68	0	0.6180
简化分支定界	1.3431	1.1250	16.24	0	72.6366

注: N 为系统中超出给定电压上、下限的节点个数; t 为 CPU 计算时间; 表 2 同。

表 2 IEEE- 300 系统优化结果
Tab.2 Optimized results of IEEE- 300 system

优化方法	$P_{L0}/p.u.$	$P_L/p.u.$	$L_P/\%$	N	t/s
本文方法	5.9337	4.5429	23.44	0	39640
连续优化	5.9337	4.5105	23.99	0	1.5294
简单归整	5.9337	4.9070	17.30	12	3.1492
简化分支定界	5.9337	4.5871	22.69	0	988.0

从表 1 和表 2 可以看出, 简单归整的方法能使网损有一定程度的下降, 但有可能造成节点电压越限。虽然 118 节点的测试系统没有电压越限, 但是 300 节点的测试系统有电压越限, 得到不可行解, 显然是不可取的。虽然连续优化方法的有功网损变化百分比值最大, 优化后网损下降最多, 但与实际的调度运行情况不符, 无法操作。故从实际的调度意义上, 采用原对偶内点法结合分支定界法的有功网损变化百分比值最大, 网络损耗下降最多, 在优化效果上最佳, 并且所有的约束条件都得以满足, 得到了全局最优解。简化分支定界方法使网损下降的效果也较为明显, 约束条件也都得以满足, 但是有功网损变化百分比值较完全分支定界法要小, 得到次优解。

另外, 从表 1、2 可计算出, 采用完全分支定界法和简化分支定界法在 IEEE- 118 和 IEEE- 300 的测试系统上耗时比约为 20 倍和 40 倍, 即采用简化分

支定界法能够较大地提高计算速度。表 3 是将这 2 种方法用于求解无功问题的简单比较。

表 3 简化分支定界法和完全分支定界法比较

Tab.3 Comparison between simplified branch-and-bound method and full branch-and-bound method

系统名称	分支次数	求解子问题数目	整数可行解数
IEEE- 118	46 / 48	90 / 2006	2 / 60
IEEE- 300	215 / 219	428 / 10054	2 / 30

注：“ / ”前、后分别对应简化分支定界法和完全分支定界法的计算结果。

从表 3 可以看到，用简化的分支定界法的分支次数和完全分支定界法分支次数是很相近的。这也反映了电力系统规模增大时，简化的分支定界法剪支原则的有效性，即取目标值较小的子问题作为下次分支的父问题是有效的。系统规模增大后，离散变量的增加使得分支的次数显著增多，完全分支定界法求解子问题的数目急剧增加，求解非常耗时。这也是完全分支定界法的一个缺点。

5 结论与展望

采用一种基于广度优先遍历的分支定界法结合原始对偶内点法对大规模的电力系统进行无功优化，实现了精确求解混合整数规划的全局最优解。通过对 IEEE- 118 和 IEEE- 300 2 个测试系统进行仿真计算，得到比传统算法更为合理的最优解。但是随着系统规模的增大，分支定界法的计算时间急剧增加。采用简化分支定界法，按照对系统无功影响较大的投切的电容器进行优先分支，可较显著地提高计算速度。

基于现代飞速发展的计算机技术，为了解决完全分支定界法用于求解大规模电力系统无功优化的单机运算耗时巨大的矛盾，以达到最佳的优化效果，可以考虑采用并行或是分布式的计算方法以实现快速和高效地求解全局最优解。

参考文献：

[1] 许文超,郭伟. 电力系统无功优化的模型及算法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(1): 100- 104.
XU Wen- chao, GUO Wei. Summarize of reactive power optimization model and algorithm in electric power system[J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(1): 100- 104.

[2] 李丽英,周庆捷. 电力系统无功优化问题研究综述[J]. 电力情报, 2002(3): 69- 74.
LI Li- ying, ZHOU Qing- jie. Research on var optimization in power systems[J]. Information on Electric Power, 2002(3): 69- 74.

[3] 倪明放,汪泽焱. 求解混合 0- 1 线性规划问题的一种分支定界算法[J]. 数值计算与计算机应用, 1999, 20(3): 199- 204.
NI Ming- fang, WANG Ze- yan. A branch and bound algorithm for solving mixed 0- 1 linear programming problem[J]. Journal of Numerical Methods and Computer Applications, 1999, 20(3): 199- 204.

[4] 许诺,黄民翔. 原始对偶内点法与定界法在无功优化中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(8): 26- 30.
XU Nuo, HUANG Min- xiang. Application of primal- dual interior

point method and branch- bound method in reactive power optimization[J]. Proceedings of the EPSA, 2000, 12(3): 26- 30.

[5] 刘明波,程莹. 求解无功优化的内点线性和内点非线性规划方法比较[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(1): 22- 26.
LIU Ming- bo, CHENG Ying. Comparative studies of interior- point linear and nonlinear programming algorithms for reactive power optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(1): 22- 26.

[6] 徐进东,丁晓群. 基于非线性预报- 校正内点法的电力系统无功优化研究[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 36- 40.
XU Jin- dong, DING Xiao- qun. A nonlinear predictor- corrector interior point method for reactive power optimization in power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 36- 40.

[7] 范宏,韦化. 基于扰动 KKT 条件的原始- 对偶内点法和分支定界法的最优潮流研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(5): 5- 9.
FAN Hong, WEI Hua. Study on optimal power flow based on primal- dual interior point algorithm under perturbed KKT conditions and branch-and-bound method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5): 5- 9.

[8] NORKIN V I, PFLUG G C. A branch and bound method for stochastic global optimization[J]. Math Program, 1998, 83(3): 425- 450.

[9] 黄伟,刘明波. 混合整数无功优化问题的连续优化方法[J]. 继电器, 2005, 33(11): 5- 8.
HUANG Wei, LIU Ming- bo. A continuous optimization algorithm for mixed integer reactive- power optimization[J]. Relay, 2005, 33(11): 5- 8.

[10] WRIGHT M H. The interior- point revolution in optimization: history, recent developments, and last consequences[J]. Bulletin (New Series) of the American Mathematical Society, 2004, 42(1): 39- 56.

[11] 李劲波,周理. 基于仿射变换内点算法的大电网无功优化[J]. 电网技术, 1997, 21(3): 22- 24.
LI Jin- bo, ZHOU Li. An affine transformation based interior point algorithm for bulk power system var optimization[J]. Power System Technology, 1997, 21(3): 22- 24.

[12] WEI H, SASAKI H, KUBOKAWA J, et al. Large scale hydro- thermal optimal power flow problems based on interior point nonlinear programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 396- 403.

[13] WEI H, SASAKI H, KUBOKAWA J, et al. An interior point nonlinear programming for optimal power flow problems with a novel data structure[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(3): 870- 877.

[14] 郭靖,陈青. 电力系统无功优化的原始对偶内点算法及其应用[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(5): 41- 43.
GUO Jing, CHEN Qing. Primal- dual interior point algorithm for reactive power optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5): 41- 43.

[15] 徐渝,胡奇英. 运筹学[M]. 西安: 陕西人民出版社, 2001.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

石 韦(1981-), 女, 壮族, 广西柳州人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统最优运行与规划(E- mail: gxushiwei_1@126.com);

韦 化(1954-), 男, 壮族, 广西柳州人, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统最优运行与规划, 涉及电力市场、电力系统分析与计算、最优潮流、水火电力系统最优潮流、电压稳定、状态估计、网格与分布计算等;

白晓清(1969-), 女, 四川云阳人, 博士研究生, 研究方向为电力系统最优运行与规划。

电子式互感器相位补偿方法研究

阳 靖, 周有庆, 刘 琨

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 根据电子式互感器的信号传输原理, 提出了一套相位补偿方法。简要分析了电子式互感器产生误差的原因, 对 Rogowski 线圈产生的相位超前和高压侧向合并单元传输信号所产生的延时分别作出定义和分析。针对这 2 种原因产生的相位误差设计出的一套完整的补偿方法, 由于 Rogowski 线圈产生的相位超前, 设计了一种采用 ADE 7759 芯片的数字积分电路, 可基本还原线圈引起的超前相位; 由于传输过程中产生的延时, 介绍了一种移相用软件算法, 可对延时进行有效补偿。该算法在合并单元数字信号处理器(DSP)中执行, 经测试后效果良好。最后, 对补偿过程中出现的问题进行了分析, 并设计了解决方案。

关键词: 电子式互感器; 相位误差; 相位补偿

中图分类号: TM 45

文献标识码: A

文章编号: 1006- 6047(2007)03- 0045- 04

新型电子式互感器相比较于传统电磁型互感器, 传感机理不同, 信号的传输方式不同, 二次输出方式主要采用数字化输出, 因此, 电子式互感器输出信号与真实原边信号之间误差产生的原因及校正方法均与电磁型互感器有较大差别。误差主要有相位和幅值两方面, 有效频段内的幅值误差, 在设计滤波器和确定变比系数等参数时都能被较好地考虑到。所以电子式互感器输出相位误差相对幅值误差而言影响较为严重, 要想使原边有用频段的信号不失真, 就必须进行相位补偿^[1-2]。

根据 IEC 60044- 8 中规定, 在工频额定电流条

收稿日期: 2006- 04- 28; 修回日期: 2006- 08- 20

件下, 0.2 级电流互感器允许的最大相差为 10°; 在 5 % 额定电流条件下, 可允许的最大相差为 30°。

1 电子式互感器相位误差的定义与分析

1.1 相位误差的定义

对于传统互感器而言, 相位误差与相位差定义相同, 即都是指一、二次信号间总的相角差, 而对于数字式输出的电子式互感器而言, 相位差 φ 是指一次侧某电流出现时刻与二次数字化数据传输启动时间之间的时间差, 相位误差 φ_e 则较为复杂, 重新定义后为 φ 减去因额定相位差 φ_{or} (电子式互感器因选用技术产生的额定相位差) 以及额定延时时间 t_{dr} (数据

Reactive power optimization in large-scale power systems with discrete variables

SHI Wei, WEI Hua, BAI Xiao-qing

(Electrical Engineering College, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: This paper presents a new method, IBBM (Interior Branch-and-Bound Method), to gain the exact solution of reactive power optimization, which coincides with that the mathematical model of a practical power system usually includes both discrete and continuous variables. By converting discrete variables into continuous variables, applying the primal-dual interior method to global optimization within the feasible domain and integrating with the branch-and-bound method based on BFS (Breadth-First-Search) for the discrete variables, the more reasonable exact solution can be obtained than the conventional result. Moreover, a simplified branch-and-bound method is proposed to reduce the execution time which increases with the size of system growing. Numerical simulations on two IEEE standard test systems, IEEE-118 and IEEE-300, respectively verify that the proposed algorithm is effective to solve reactive power optimization problem of large scale of power system.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China (50467001) and the National Natural Science Foundation of Guangxi (0448025).

Key words: reactive power optimization; branch-and-bound method; primal-dual interior point method