

最优潮流的发展

李彩华, 郭志忠

(哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 最优潮流是在保证系统安全运行的前提下, 实现系统经济运行的问题。由于其安全约束众多、数学模型复杂, 而难以实现。此文将回顾近二十年来最优潮流的逐步发展的过程, 对主要的优化方法列出几篇具有代表性的文章, 列出几种简单的数学模型并对各种方法的优化效果做出比较。并对最优潮流的进一步发展做出深入的探讨。

关键词: 最优潮流; 牛顿法; 内点法; PQ分解法; 线性规划法; 非线性规划法; 二次规划法

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)01-0001-06

1 引言

最优潮流是指从电力系统稳定运行的角度来调整系统中各种控制设备的参数, 在满足节点正常功率平衡及各种安全指标的约束下, 实现目标函数最小化的优化过程, 通常的目标函数是发电费用、发电耗量或全网的网损。由于最优潮流是同时考虑网络的安全性和经济性的分析方法, 是传统的经济调度方法无法取代的, 因此在电力系统的安全运行、经济调度、电网规划、复杂电力系统的可靠性分析、传输阻塞的经济控制、能量管理系统等方面得到广泛的应用。

早在1962年, J. Carpentier介绍了一种以非线性规划方法来解决经济分配问题^[1], 首次引入了电压约束和其它运行约束, 这种考虑更为周全的经济调度问题就是最优潮流(OPF)问题的最初模型。其通常的数学描述为:

$$\text{目标函数: } \min f = f(x) \quad (1)$$

$$\text{约束条件: } g(x) = 0 \quad (2)$$

$$h \leq h(x) \leq \bar{h} \quad (3)$$

式中: f 为优化的目标函数, 可以为系统的发电费用函数、发电燃料、系统的有功网损、无功补偿的经济效益等等。 g 为等式约束条件, 节点注入潮流平衡方程。 h 为系统的各种安全约束, 包括节点电压约束、发电机节点的有功、无功功率约束、支路潮流约束、变压器变比、可变电容器约束等等。其中各变量的具体含义可参考文献[2]。

从六十年代提出最优潮流问题到今天, 许多学者对这个问题做出了深入的研究, 文献[3-5]中介绍了最优潮流的数学模型和基本方法。从数学上讲, 最优潮流问题是一个多变量、高维数、多约束、连续

和离散的变量共存混合非线性优化问题。目前研究得比较成熟的优化方法有线性规划法、非线性规划法、二次规划法, 在简要介绍以上三种方法后, 我们将详细地介绍牛顿法最优潮流、内点法最优潮流、PQ分解法最优潮流和针对离散变量的混合整数规划法的最优潮流问题, 并对最优潮流的进一步发展做出深入的探讨。

1.1 线性规划法

线性规划是研究在一组线性约束条件下, 寻找目标函数的最大值或最小值的问题。

线性规划方法对严格的凸函数优化很有效, 但对有功无功耦合的目标函数优化, 尤其是对以网损最小化为目标的优化效果不好, 加之在最优潮流问题中, 要考虑的等式约束方程, 即每个节点的有功和无功功率注入平衡方程是典型的非线性方程, 因此在耦合的最优潮流问题中较少使用线性规划法求解。但由于有功潮流可以以很好的精度线性化, 而电力系统经济调度主要对发电厂有功进行调配, 因此线性规划方法能够在安全约束经济调度中广泛应用^[6,8]。而电力系统无功优化非线性较强, 线性化后的优化效果较差, 所以在最优潮流中, 线性规划方法多数用在解耦最优潮流的 P 迭代中^[3,4]。它的优点是计算速度快、收敛可靠, 便于处理大量的约束, 因此适合对大系统进行优化计算。

1.2 非线性规划法

非线性规划法处理在等式约束和/或不等式约束条件下优化目标函数, 其中等式约束、不等式约束或目标函数至少有一个为非线性函数。

其中二次规划法、牛顿法、惩罚函数法以及近几年讨论比较多的内点法都是非线性规划法的一种。由于最优潮流问题中的等式约束是典型的非线性等

式,因此非线性规划法也就成为解决最优潮流问题的常用方法。

二次规划法所优化的目标函数多为二次实函数,其约束为线性的等式、不等式。由于二次规划可以由泰勒展开转化为线性规划,因求解简单而近年来得到了人们的青睐。且二次规划法和牛顿法都是二阶的方法^[9-11],用这两种方法解决最优潮流问题收敛精度较好,同时非线性规划法能克服线性规划的毛病,能很好地解决耦合的最优潮流问题,但这类方法的缺点是计算 Lagrange 函数的二阶偏导数,计算量大、计算复杂。

2 牛顿法

牛顿法优化潮流的数学模型见(1)~(3)式的描述,牛顿法中将等式约束由 Lagrange 乘子引入到目标函数中,构成如下的扩展 Lagrange 函数:

$$L(x, \lambda) = f(x) + \lambda^T \cdot g(x) \quad (4)$$

式(4)是一组以向量 x 和 λ 为变量的无约束的非线性方程组,用牛顿法求解式(4)的迭代方程为:

$$\begin{bmatrix} H(x, \lambda) & J(x) \\ J(x) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \partial L / \partial x \\ \partial L / \partial \lambda \end{bmatrix} \quad (5)$$

上式中的 $H(x, \lambda)$ 为 Lagrange 函数的 Hessian 阵, $J(x)$ 为等式约束的 Jacobi 矩阵。以(5)式求出的结果对各变量进行修正,将修正后违约的变量或函数以罚函数的形式引入到增广的目标函数中,由于引入的罚函数只对 Hessian 阵的部分对角元素有影响,因此对违约不等式约束的处理,在牛顿法中多采用试验迭代处理,对违约变量进行修正。式(4)~(5)中各函数的含义见文献[2]。

自从 1984 年 David Sun 等人提出以牛顿法解最优潮流到现在,已经有多位学者对该方法做出了更全面的研究和改进,而不同文献对牛顿法 OPF 中不等式约束处理提出了不同的处理方案。

文献[12]提出以牛顿法为基础的最优潮流用以实现系统无功的优化,这种方法被公认为是牛顿 OPF 算法实用化的重大飞跃。该法以 Lagrange 乘法处理等式约束,以惩罚函数法处理违约的变量不等式约束。该文首次将电力系统的稀疏性与牛顿法结合起来,使得计算量大大减小,也结束了牛顿法无法用于最优潮流解算的历史。对 912 节点的系统测试,利用解耦的 PQ 分解牛顿法迭代,效果较好。其缺点是对函数不等式约束处理得不好。

文献[13]中提出运用牛顿法解决系统有功网损和无功补偿费用的优化问题,提出以单变量的二次

惩罚函数处理不等式约束的方法,其计算初值采用潮流计算初值,而且其所需内存量只是普通牛顿法潮流的二倍,计算速度快、收敛性好。并运用该方法对多个 IEEE 标准测试系统和华北系统 328 节点等系统进行了优化计算,有功网损下降高达 45.43%,无功补偿节省费用高达 364 万元。

针对牛顿法最优潮流的试验迭代对不等式约束的处理,文献[14]提出了进一步解决的方案,即在不等式约束处理过程中考虑优先级策略,作者认为变量型约束优先级高,函数型约束优先级低。当高优先级约束逐步稳定后再将低优先级约束引入试验迭代。该文提出了由“有效约束集”向“紧约束集”转变的过程处理策略,对无功补偿设备和变压器分接头变比的处理,采用将 Hessian 阵对角元置一小数,解决 Hessian 阵病态问题。

同样在文献[15]、[18]中,提出快速预估起作用的不等式约束集方法。文献[15]根据电网拓扑结构,将有越限的母线分成多层,每一层选取一个越限相对严重的节点进入起作用的不等式约束集,依次处理各层搜索到所有节点,这种方法相对节省迭代次数。而试验迭代采用有限次终止策略。而文献[18]基于有效标准,选择和施加最少数量起作用的不等式约束,以少的振荡很快得到优化解。

由于牛顿法最优潮流中起作用的不等式约束集无法事先预测,需要进行试验迭代来确定,增加了计算的难度和复杂性。针对此问题,文献[16]提出用线性规划技术,取代试验迭代来进行有效不等式约束的识别,从而跨越了试验迭代这条鸿沟。

文献[15]同时分析了 Hessian 阵病态的 4 个原因,分别是发电费用函数近似为线性,造成 Hessian 阵对角不占优;初始参数不合适, V 、 t 取 0、1 启动, t 取中间值,而 p 、 q 初值对计算收敛与否影响很大,两者根据经验值确定;变压器支路阻抗的电阻很小,也易造成 Hessian 阵对角不占优;发电机连接支路的电阻为零,造成发电机节点的无功可调节节点的电压灵敏度为零;针对以上四种较小的对角元,设置一个限值,低于限值时强行置于用稳定因子与限值乘值上,稳定因子随迭代进行而改变,这种软惩罚策略保证了 Hessian 阵非病态。

文献[17]针对牛顿法最优潮流中的 Hessian 阵易于出现接近奇异或奇异情况,提出以适应性移动罚函数法处理 Hessian 阵小或零对角元素,保证了 Hessian 阵的正定性同时不影响收敛速度。

Newton 最优潮流的特点:

(1) 充分利用了电力系统的稀疏性,计算量大减小;

(2) 用试验迭代确定有效约束集,编程实现困难;

(3) 对应控制变量的 Hessian 阵对角元易出现小值或零值,造成矩阵奇异;

(4) 引入的 Lagrange 乘子的初值对迭代计算的稳定性影响大;

3 内点法

1984年,Karmarkar提出了线性规划的一个新算法,即内点法。目前该方法已被扩展应用于求解二次规划和非线性规划模型,因此可以用内点法来解决最优潮流问题。内点法 OPF 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。内点法一般是以对数障碍函数为基础的,针对不等式约束,引入松弛变量将不等式约束转化为等式约束,引入 Lagrange 乘子将等式约束(2)和由(3)式转化而来的等式约束引入扩展的目标函数,同时在原目标函数中对各松弛变量引入对数障碍函数^{[22][24][25]},形成如下的扩展目标函数:

$$\min F = f(x) + \lambda^T g(x) + u^T [h(x) + S_u - \bar{h}] + v^T [h(x) - S_d - \bar{h}] + \mu [\ln(S_u) + \ln(S_d)] \quad (8)$$

对无约束(8)式的优化,文献[26]以下面的方法求解:

$$\begin{bmatrix} H(x, \lambda) & J(x)^T \\ J(x) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} (x, \lambda) \\ g(x) \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中 $H(x, \lambda)$ 和 (x, λ) 的具体描述见文献[26],(9)式的表述与(8)式相比大大降低了问题的维数,同时也可以借鉴牛顿法最优潮流的计算方法,系数矩阵也是高度稀疏的,可以充分利用电力系统的稀疏性,而且内点法不需要试验迭代,因此编程比牛顿法要简单,易于实现。

文献[19]提出一种对偶仿射尺度法(内点法的一种变形)来解决水力发电计划的问题。该问题被描述成一个具有等式和不等式约束的线性规划数学模型,本方法对解决该类大系统的优化迭代次数较少,一般为20-60次即可收敛。这种方法能够处理有大量约束的线性和非线性的优化问题,文中对具有118节点、3680个约束的系统进行优化,效果理想。它的缺点是只适合处理不等式约束的优化问题,对等式约束需要进行变形处理,而且需借用其它方法获得其初值。

文献[20]提出二阶内点法来求解系统最优潮

流、经济调度和无功计划的问题。该方法能够处理具有线性约束的线性或非线性目标函数,对IEEE14节点标准系统的最优潮流优化的时间只是MINOS 5.0软件的八分之一,但该文并没有对经济调度和无功计划做出测试。

文献[22]中提出了预报-校正原对偶内点法解非线性最优潮流问题,在这种方法中同时考虑和处理等式和不等式约束,将直接的原-对偶内点法的结果作为预报值,将系统形成一个对称系数的方程组,而且这个系数矩阵的稀疏结构是固定的,因此该方法的计算量小。该文对9节点到2423节点等多个系统进行了运算,其结果与原-对偶内点法 OPF 的结果相比,计算速度快、迭代次数少。

文献[23]提出以基于二次内点法的分区优化的方法来解决大系统的优化问题,对于内联的系统根据区域的不同特点进行分区,对不同的区域的各自特点进行有不同目标函数的优化,使整个系统的优化更加合理。

文献[21]、[25]分别提出了基于对数障碍函数的原-对偶内点法来完成系统的无功优化、最优潮流,引入松弛因子将变量不等式约束变为等式约束,将松弛因子以对数障碍函数的形式引入目标函数,形成一个无约束的扩展目标函数。文献[25]中,扩展目标函数在满足Kuhn-Tucker条件下,将中间变量转移,得出与牛顿法同样形式同样稀疏的方程式。作者提出了原变量和对偶变量取不同的迭代步长,同时指出没有限值的量也要有步长限制。障碍参数与变量数目、松弛因子和拉格朗日乘子都有关系。该方法不需试验迭代,运算简单。

文献[26]在以内点法非线性规划方法来解决最优潮流问题的同时,阐述了中心方向概念并将这种方法扩展到经典潮流和近似最优潮流,近似最优潮流的解与最优潮流的解很相近,但其计算时间比最优潮流的计算时间要短很多。同时该文献提出了一种新的数据结构方式,与传统的牛顿最优潮流数据结构相比,其优点在于计算的注入元减少了一半,计算时间降低15%。文献[27]分别对以发电费用、系统网损和无功补偿费用等最小化为目标函数的优化问题,提出了统一的解决方案。

内点法的特点:

- (1) 其迭代次数与系统规模或控制变量的数目关系不大;
- (2) 数值鲁棒性强;
- (3) 没有识别起作用约束集的困难。

4 PQ 分解法

PQ 分解法是解决电力系统问题特有的一种方法。针对电力系统传输网络的物理弱耦合性,有功功率和电压相角的关系比较大,无功功率和电压幅值的关系比较大,因此可能将有功功率和无功功率解耦优化,它解决了以往的耦合型牛顿最优潮流计算时间较长,而且计算量大的缺点。在 PQ 分解法的最优潮流中应用了线性规划法、二次规划法、梯度法和牛顿法或者是上述方法的混合。

Dopazo 在 1967 年首先提出 PQ 分解解决电力系统问题后,该方法得到了广泛的应用。文献[28] - [30]中通过计入系统的静态安全约束把 OPF 问题转化成非线性最优化问题,忽略有功和无功的耦合影响,把系统优化分解为有功、无功优化两个优化子问题,交替迭代求解。其中文献[28]可以对解耦后的有功、无功子问题分别赋予不同的目标函数,求解具有一定的灵活性。而文献[30]使用二次规划法对无功优化问题求解,与前两者相比提高了无功子问题的优化效果。文献[31]在以 PQ 解耦技术对有功、无功交替优化同时,计入了有功无功的相互影响,与文献[28] ~ [30]的方法相比大大减少迭代次数。

在最优潮流中每次迭代都要重新计算 Hessian 阵,计算量大。因此文献[32]、[33]的作者提出了简化计算该矩阵的想法。文献[32]结合电力系统支路参数特征,解决了牛顿法最优潮流算法 Hessian 阵元素的合理常数化问题,Hessian 阵的元素只与平衡机的耗量微增率与节点导纳的乘积有关,并在此基础上,提出了快速解耦牛顿法。该算法在迭代过程中不必重新形成扩展 Hessian 阵的因子表,显著地缩短了每次迭代的时间,适合在线计算。快速解耦的牛顿最优潮流算法分析了不等式约束、节点电压和 Lagrange 乘子等因素对 Hessian 阵元素的影响,合理地将这些因数常数化,使 Hessian 阵近似为常数,使解耦后的计算量和计算时间都大大减少,但这种方法的缺点是迭代次数多。文献[33]针对电力系统的稀疏特性,根据电力网络的特点提出了拟罚函数法,有效地处理了有功电源和无功电源的不等式约束。在不影响结果的精度的前提下,对 Jacobi 矩阵和 Hessian 阵简化处理,减小了计算工作量。应用到京津塘 122 节点和华北电网 232 节点系统的无功优化,网损分别下降 12.5% 和 13.6%。

用同一种方法处理解耦最优潮流中的有功、无

功子问题,往往是有功子问题收敛效果好,而无功子问题的优化收敛很慢,针对这一现象,文[34]提出了用混合解耦法最优潮流,用线性规划法求解有功优化子问题,用非线性规划法求解无功优化子问题,对两个问题交替求解,在求解有功子问题时无功变量保持常值,在求解无功子问题时有功变量保持常值,降低了求解问题的维数,这种方法在保证了解耦的有效性同时也保证了灵活性。在中国东北的电力控制中心实际在线应用效果较好。

用解耦方法求解最优潮流问题存在以下三个缺陷,一是解耦最优潮流不像解耦潮流和状态估计那样直接,因为一些类型的约束如支路潮流,与有功和无功变量的关系都很大,不能直接地分解成两个子问题,因此目前的方法没有对此类约束很好地处理。二是两个解耦子问题都要求出高精度的中间解,每一步迭代都需要大量的时间。三是在迭代过程中或迭代的末尾需要进行潮流计算,可能增加计算负担。

5 混合整数规划法

混合整数规划法是线性规划法的一种,因其部分变量为整数而得名。电力系统中既存在像发电机输出功率、节点电压等这样的连续变量,又存在像变压器变比、可调电容等离散变量。这两种变量的同时存在,使得最优潮流问题成为比较复杂的混合整数规划问题。

一些文献将离散控制变量当作连续变量处理,得到最优解后,将其强制固定在最近的分级上,再对连续变量做一次优化潮流计算,这种处理方法对步长较小的变压器变比可以进行优化^[39],但对步长较大的可变电容器处理易造成目标函数的增加或引起不等式约束违约^[38],从而降低 OPF 的实际应用价值。负曲率罚函数的直接使用将使目标函数变成非凸的函数,为了解决这个问题,文献[35]针对以一个新的罚函数——负曲率二次罚函数的切线函数法来处理,该文中对惩罚函数的幅值确定、罚函数施加的时机、修正罚函数的标准、罚函数与变量上下限约束的协调等问题做出了明确的阐述,而且可以很方便嵌入到已有的最优潮流程序中,而不增加寻优的复杂程度。

文献[36]提出基于正曲率二次罚函数的控制离散变量的处理方案。利用二次罚函数所产生的虚拟费用迫使该变量到达它的一个分级上,并成功地将该方法与牛顿法最优潮流结合,通过对 IEEE118 节点系统、我国的上海部分电网和东北电网系统例算

计算表明,优化效果较好。

在系统无功功率计划问题中的电容或电抗的数目是离散变量,但以往的文献多将其连续化。文献[37]中针对此类离散变量建立了精确的数学模型,使得其新电容的安装费用最小。但这一方法所需计算时间随离散控制变量数目的增加呈指数增加,对大规模电网的计算速度慢,不可取。

针对离散控制变量的引入造成 Hessian 阵的奇异,这种矩阵的非正定性而带来的数值不稳定性,文献[38]对此作了深入的分析,并提出相应的修改策略。而文献[14]采用将 Hessian 阵对角元置一小数,解决 Hessian 阵病态问题。

6 其它方向

由于最优潮流问题是考虑各种不等式约束的经济调度问题的转化,因此从本质上说最优潮流问题与经济调度问题是相通的。就两者的相通性,文献[41]做出了详细的阐述,当所有的不等式约束都不越界时,最优潮流遵循有功的等耗量增率原则和无功的等网损微增率原则。当发电机的发电功率越界时,违界的电源退出协调区,留在协调区内的电源仍服从等微增率原则,同时最优潮流的 Lagrange 乘子也满足等微增率原则。

传统的优化潮流 OPF 都是针对静态的电力系统来分析的,而电力系统实际上是一个动态变化的系统,针对这一特点文献[42]提出了考虑动态安全约束的最优潮流,该文章在解决动态瓶颈约束的同时,在有功无功协调优化方面作了初步的尝试,通过对 78 节点的算例计算表明,该方法可以顺利地实现系统的爬坡降谷,能连续地跟踪负荷的变化。而文献[28]对节点负荷微增改变对 OPF 的影响,即 OPF 的灵敏度做出了计算,用这种灵敏度分析可以预测系统潜在的不稳定问题,如节点电压越限、线路潮流过载等,并可据此制定校正措施。

目前最优潮流研究不仅可用来解决电力系统静态安全经济调度问题,也可用来进行系统安全的预防性控制,进行危急控制及危急过后校正控制^[40]。如利用 OPF 灵敏度分析研究估计系统中无功发电对每个节点增量负荷的灵敏度,用这种信息预测系统中潜在的电压不稳定问题,以及制定补救措施。最近几年,我国电力市场的试运行,许多新问题的解决仍依赖于最优潮流,如能利用最优潮流解决电力市场中的传输拥挤问题^[43]、计算节点的实时电价^[44]、计算电力运费^[45]等等,尽管现有的 OPF 算

法对安全经济调度在线应用很困难,但以上的各种计算没有实时性要求,因此最优潮流在电力市场中也将发挥很大的作用。

7 总结

尽管对最优潮流问题的研究已经很深入,解决最优潮流问题的数学优化方法也得到了很大的发展,但目前最优潮流还没有全面的实用化,计算时间较长制约了它的实时在线应用。另外静态优化调度只对动态电力系统的某一个时间段求取目标最优,而忽略了各时间段之间的内在联系,因此静态的安全优化调度不能很好地解决动态安全优化调度问题。要以最优潮流来实现电力系统优化调度,就必须寻找更简化的计算方法能对系统安全性和经济性全面考虑。

参考文献:

- [1] Carpentier J. Contribution a 'l 'etude du Dispatching Economique[J]. Bulletin de la Societe Francaise des Electriciens, 1962, 3:431 - 447.
- [2] 吴际舜,侯志俭. 电力系统潮流计算的计算机方法[M],上海交通大学出版社,2000,2.
- [3] Huneault M, Galiana F D. A Survey of The Optimal Power Flow Literature[J]. IEEE Transaction on PS, 1991, 6(2): 762 - 770.
- [4] James A Momoh, M E El - Hawary, Ramababu Adapa. A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993 Part I: Nonlinear and Quadratic Programming Approaches [J]. IEEE Transaction on PS, 1999, 14(1): 96 - 104.
- [5] James A Momoh, M E El - Hawary, Ramababu Adapa. A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993 Part II: Newton, Linear Programming and Interior Point Methods[J]. IEEE Transaction on PS, 1999, 14(1): 105 - 111.
- [6] Alsac, Bright O, Prais J, Stott M, B. Further developments in LP - based optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5, (3): 697 ~ 711.
- [7] 朱文东,郝玉国,刘广一,于尔铿等.应用线性规划方法的安全约束调度[J].中国电机工程学报,1994, 14, (4): 57 - 64.
- [8] Stott B, Marinho J L. Linear Programming For Power System Network Security Applications [J]. IEEE Transactions On Power Apparatus and Systems, 1979, PAS - 98: 837 - 848.
- [9] Bartholomew - Biggs M C. Recursive Quadratic Programming Methods Based on the Augmented Lagrangian [J]. Mathematical Programming Study, 1987, 31: 21 - 41.

- [10] 程浩忠. 电力系统有功优化潮流算法研究——等效二次规划法[J]. 电力系统自动化, 1991, 4-5: 52-57.
- [11] Aoki K, Satoh T. Economic Dispatch with Network Security Constraints Using Parametric Quadratic Programming[J]. IEEE Trans on PAS, 1982, 101(12): 4548-4556.
- [12] David I Sun, Ashley B, Brewer B, Hughes A, Tinney W F. Optimal Power Flow by Newton Approach[J]. IEEE Trans on PAS, 1984, 103(10): 2864-2880.
- [13] 张力平, 何大愚, 朱太秀. 牛顿法最优潮流与最优无功补偿[J]. 中国电机工程学报, 1987, 7(1): 11-19.
- [14] 郝玉国, 张靖, 于尔铿, 刘广一. 最优潮流实用化研究[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(6): 388-391.
- [15] 赵晋权, 侯志俭, 吴际舜. 改进最优潮流牛顿算法有效性的对策研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(12): 70-75.
- [16] Maria G A, Findlay J A. A Newton Optimal Power Flow Program for Ontario Hydro EMS[J]. IEEE Trans on Power System, 1987, 2(10): 576-584.
- [17] Monticelli A, Wen - Hsiung E Liu. Adaptive movement Penalty Method for The Newton Optimal Power Flow[J]. IEEE Transaction on PS, 1992, 7(1): 334-340.
- [18] Crisan O, Mohtadi M A. Efficient identification of binding inequality constraints in optimal power flow Newton approach[J]. Generation, Transmission and Distribution IEE Proceedings C, 1992, 139(5): 365-370.
- [19] Ponnambalam K, Quintana V H, Vannelli A. A fast algorithm for power system optimization problems using an interior point method[C]. Power Industry Computer Application Conference, 1991, Conference Proceedings, 1991: 393-400.
- [20] Momoh J A, Austin R F, Adapa R, Ogbuobiri E C. Application of interior point method to economic dispatch[C]. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1992, (2): 1096-1101.
- [21] Granville S. Optimal reactive dispatch through interior point methods[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 136-146.
- [22] WU Yu - chi, Atif S Debs, Roy E Marsten. A Direct Nonlinear Predictor - Corrector Primal - Dual Interior Point Algorithm for Optimal Power Flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 876-883.
- [23] Momoh J A, Dias L G, Guo S X, Adapa R. Economic operation and planning of multi - area interconnected power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 1044-1053.
- [24] Wei H, Sasaki H, Yokoyama R. An Application of Interior Point Quadratic Programming Algorithm to Power System Optimization Problems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 260-266.
- [25] 郝玉国, 刘广一, 于尔铿. 一种基于 Karmarkar 内点法的最优潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(6): 409412.
- [26] Wei Hua, Sasaki H, Kubokawa J, Yokoyama R. An Interior Point Nonlinear Programming for Optimal Power Flow Problems With A Novel Data Structure[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 870877.
- [27] Momoh J A, Zhu J Z. Improved Interior Point Method for OPF Problem[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1999, 14, (3): 1114-1120.
- [28] Shoultz R R, Sun D T. Optimal Power Flow Based upon P - Q Decomposition[J]. IEEE PAS, 1982, PAS - 101(2): 397-405.
- [29] Contaxis G C, Papadakis B C, Delkis C. Decoupled Power System Security Dispatch[J]. IEEE Transaction on PAS, 1983, PAS - 102(9): 3049-3056.
- [30] 傅书述, 于尔铿, 张小枫. 采用 P - Q 分解技术和二次规划解法的电力系统最佳潮流的研究[J]. 中国电机工程学报, 1986, 6(1): 1-11.
- [31] 胡珠光, 傅书述. 实时在线最优潮流[J]. 中国电机工程学报, 1991, 11(6): 41-49.
- [32] 王宪荣, 包丽明, 柳焯, 于尔铿, 刘广一, 张靖. 快速解耦牛顿法最优潮流[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(4): 2632.
- [33] 严正, 陈雪青, 相年德, 吴榕, 李群炬. 优化潮流牛顿算法的研究及应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1989, 29, (1): 6978.
- [34] Yan Z, Xiang N D, Zhang B M, Wang S Y, Chung T S. A hybrid decoupled approach to optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11, (2).
- [35] Liu W H, Papalexopoulos A D, Tinney W F. Discrete Shunt Controls in a Newton Optimal Power Flow[J]. IEEE Trans on PAS, 1992, 7(4): 1509-1518.
- [36] 赵晋权, 侯志俭, 吴际舜. 牛顿最优潮流算法中离散控制变量的新处理方法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(23).
- [37] Aoki K, Fan M, Nishikori A. Optimal VAR Planning by Approximation Method for Recursive Mixed - Integer Linear Programming[J]. IEEE Transaction on PAS, 1988, 3(4): 1741-1747.
- [38] Tinney W F, Bright J M, Demaree K D, et al. Some Deficiencies in Optimal Power Flow[J]. IEEE Trans on PAS, 1988, 3(2): 676-683.
- [39] Papalexopoulos A D, Imparato C F, Wu F F. Large - scale Optimal Power Flow Effects of Initialization, Decoupling and Discretization[J]. IEEE Trans on PAS, 1989, 4(2): 748-761.

(下转第 56 页)

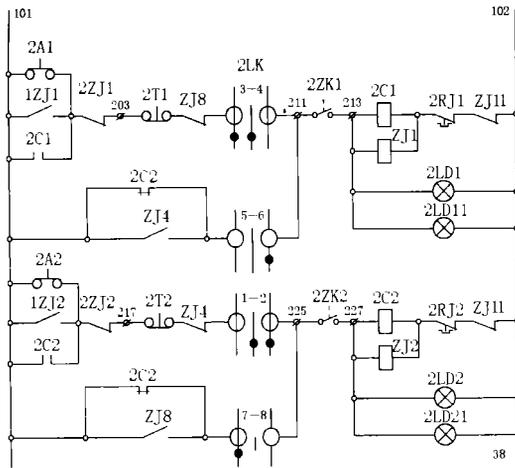


图2 低压润滑油站联锁部分改进图

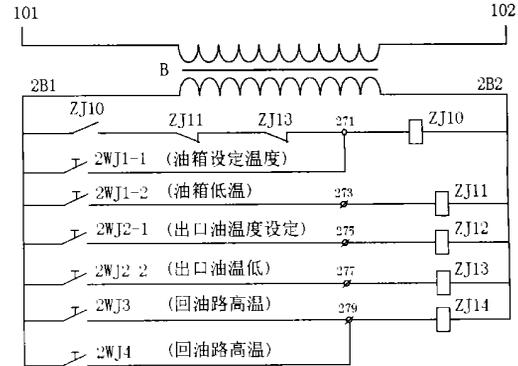


图3 低压润滑油站油温控制部分改进图

收稿日期: 2001-03-23

作者简介: 程蓓(1970-),女,本科,讲师,从事热动力教学与研究工

Improvement of lubricating oil electric control system defaults in pulverizer

CHENG Bei

(Anhui Electric Power College for Staff, Hefei 230022, China)

Abstract: This paper analysed the electric control defaults of the lubricating oil system on the balltube mills in Tianjia an Power Plant, and gives proper renovating programs in detail. Operating experience has shown that the renovation effect is satisfying, and no incipient fault exists.

Keywords: oil system; electric control; improvement

(上接第6页)

- [40] Paul R Gribik, Dariush Shirmohammadi, shangyou Hao, et al. Optimal Power Flow Sensitivity Analysis[J]. IEEE Trans on PS, 1990, 5(3): 969 - 976.
- [41] 王宪荣, 柳焯. 最优潮流与经济调度的相通性[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(3): 8 - 13.
- [42] 王永刚, 韩学山, 王宪荣, 柳焯. 动态优化潮流[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 195 - 198.
- [43] 赵晋泉, 侯志俭, 黎强. 用最优潮流分析实时电价下的传输拥挤管理[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(12): 1562 - 1566.
- [44] Kai Xie, Yong-hua Song, Erkeng Yu, Guangyi Liu. De-

composition model and Interior Point methods for optimal spot pricing of electricity in deregulation environments[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 39 - 50.

- [45] 林曦, 顾锦汶. 用最优潮流计算电力转送费用[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(7): 11 - 15.

收稿日期: 2001-04-17

作者简介: 李彩华(1974-),女,博士研究生,从事电力系统优化和电力市场方面的研究; 郭志忠(1961-),男,教授,博士生导师,从事电力系统稳定、电力系统优化和电力市场等方面的研究。

Development of optimal power flow

LI Cai-hua, GUO Zhi-zhong

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Optimal power flow is to run power system in security and economy. It is difficult to be fulfilled because it has so many security binding sets and complex mathematical model. This paper reviewed the development of OPF in recent twenty years. Some important articles about optimal method were listed and the results of them were compared.

Keywords: optimal power flow; Newton method; interior point method; PQ decomposition method; linear programming method; nonlinear programming method; quadratic programming method