

最优潮流算法综述

万黎, 袁荣湘

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 最优潮流是一个典型的非线性优化问题,且由于约束的复杂性使得其计算复杂,难度较大。虽然人们已经提出了许多种方法,并且在部分场合有所应用,但是要大规模实用化,满足电力系统的运行要求还有不少问题要解决。此文总结了现今有关最优潮流的几个方面,从优化方法和所遇到的新问题出发,对主要的优化方进行了介绍和简要的分析,以供从事无功优化的人员参考,同时还对最优潮流的进一步发展做了一些探讨。

关键词: 最优潮流; 线性规划; 牛顿法; 内点法; 遗传算法; 并行算法

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)11-0080-08

0 引言

最优潮流 OPF (Optimal Power Flow)是指从电力系统优化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。通常优化潮流分为有功优化和无功优化两种,其中有功优化目标函数是发电费用或发电耗量,无功优化的目标函数是全网的网损。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,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等方面得到广泛的应用。

优化潮流的历史可以追溯到 1920年出现的经济负荷调度。20世纪 20年代在电力系统功率调度开始使用等耗量微增率准则 ECC (Equal Incremental Cost Criteria)。至今等耗量微增率准则仍然在一些商用 OPF软件中使用。现代的经济调度可以视为 OPF问题的简化,它们都是优化问题,使某一个目标函数最小。经济调度一般关注发电机有功的分配,同时考虑的约束多仅为潮流功率方程等式约束。

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的方法^[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:

目标函数: $\min f = f(x)$

约束条件:

$$\begin{aligned} g(x) &= 0 \\ h(x) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

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,即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。现今潮流优化都是以这个模型为基础的。

简化梯度法是第一个被成功应用的优化潮流方法,至今仍然作为一种成功的方法而加以引用。基于牛顿法的优化算法则具有更好的收敛特性。此外,二次规划算法也被提出来用于潮流优化。内点法克服了牛顿法确定约束集的困难而受到广泛重视。智能算法如遗传算法等由于具有全局收敛性和擅长处理离散变量优化问题而日益受到重视,是极具潜力的优化方法。

1 优化潮流的经典算法

1.1 线性规划法 LP (Linear Programming)

线性规划法是在一组线性约束条件下,寻找线性目标函数的最大值或最小值的优化方法。对于 OPF问题,线性规划方法一般将非线性方程和约束使用泰勒级数近似线性化处理,或将目标函数分段线性化。线性化后的求解可以用改进的单纯形法或对偶线性规划法。

文献[2]提出了将线性规划用于符合安全要求的发电厂的配置,目标函数和约束都线性化,使用单纯形法求解,受到当时计算机条件限制,其结果有时会出现不可行解;文献[3]将对偶线性规划用于优化并显示了较好的结果。

文献[4]建议将发电机费用曲线分段线性化和使用稀疏矩阵技术,并使用了一种修正单纯形法,目标函数使用二次费用曲线和最小二乘法,在 30和

126母线系统上进行了试验,考虑变压器变比等实际因素,结果表明在有限的计算时间内可以得到合理的结果。

将线性规划用于无功调度的研究可见文献[6],但是在某些算例求解过程中出现了锯齿现象。文献[7]提出使用控制变量约束来解决这个问题,当优化接近最优时再将约束放松。文献[5]提出了一种罚函数线性规划技术和线性化的无功优化模型求解无功优化问题,并在253母线墨西哥测试系统上进行了验证。文献[8,9]则提出了序列线性规划法。

由于有功潮流可以以很好的精度线性化,所以线性规划法在有功优化中应用较为成功。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地应用^[6,8]。线性规划还在解耦最优潮流的 P 迭代中得到应用^[34]。

由于无功优化问题目标函数具有强非线性,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,线性优化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,线性化后的优化效果较差。此外,线性规划算法迭代次数随网络规模增加而迅速上升,收敛变慢。这些都限制了线性规划算法在无功优化中的应用。

1.2 非线性规划方法

非线性规划法处理在等式约束或不等式约束条件下优化目标函数,其中等式约束、不等式约束和目标函数为非线性函数。简化梯度法、二次规划法、牛顿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。

1.2.1 简化梯度法 (Degraded Gradient)

1968年 Dommel和 Tinney^[10]在优化中利用牛顿拉夫逊潮流程序,采用梯度法进行搜索,用罚函数处理违约的不等式约束。该方法程序编制简便,所需存储量小,对初始点无特殊要求,曾获得普遍重视,成为第一种有效的优化潮流方法。由于该法仅在控制变量子空间上寻优,故称为简化梯度法。

梯度法实际上等同于无约束问题的最速下降法。最速下降法的基本思想是利用函数值在迭代点下降最快的方向作为寻优方向,以使函数值尽快达到极小。由于函数值下降最快的方向为负梯度方

向,因此该法也称为梯度法。OPF的简化梯度法首先利用 Lagrange乘子法引入等式约束,得到增广的目标函数 $L(x, \lambda) = F(x) + \lambda^T g(x)$,化为无约束问题求解。独立变量空间为系统的控制变量,用罚函数处理函数不等式约束。

随后 PQ解耦法^[12]和稀疏技术^[13]被使用到梯度法上。文献[14]将梯度法优化分解为两步进行,第一步不加约束进行梯度优化,第二步将结果进行修正后,在目标函数上加上可能的电压越限罚函数。该方法可以处理较大的网络规模,但是计算结果有在可行域之外。文献[15]使用共轭梯度法改进梯度法的搜索方向,结果显示收敛比常规的简化梯度法快。

简化梯度法的缺点:迭代过程中,尤其是在接近最优点附近会出现锯齿现象,收敛性较差,收敛速度很慢;每次迭代都要重新计算潮流,计算量很大,耗时较多;另外,采用罚函数处理不等式时,罚因子数值的选取对算法的收敛速度影响很大等等。现在对这种方法用于最优潮流的研究已经很少。

1.2.2 序列二次规划法 SQP (Successive Quadratic Programming)

序列二次规划法属于典型的非线性规划算法,其所优化的目标函数为二次实函数,其约束一般为线性。序列二次规划法使用拟牛顿法^[16~18]作为主算法,使用罚函数处理约束,使用一种按照一定规则更新的矩阵来近似代替二阶海森阵。有约束的拟牛顿法由于加入了 Kuhn-Tucker方程的二阶信息,能保证超线性的收敛性。在每一次主要迭代中QP子问题依次被求解,所以这种方法又称为序列二次规划法。在 Biggs, Han和 Powell工作的基础上, SQP法允许有约束的牛顿法转化为无约束的牛顿法,拟牛顿法的收敛性比梯度法要好,但是由于近似海森矩阵不是稀疏的,使得拟牛顿法在大型网络中效率不高,限制了其在大型网络中的使用。

二次规划法是二阶的方法^[10,11],解决最优潮流问题收敛精度较好,能很好地解决耦合的最优潮流问题,但缺点是计算 Lagrange函数的二阶偏导数,计算量大、计算复杂。

1.2.3 牛顿法 (Newton Method)

牛顿法是一种直接求解 Kuhn-Tucker等式寻优的方法。文献[19]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乘子法处理等式约束,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。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。

牛顿法的难点在于:在迭代过程中,中间变量是不满足潮流方程的。那么在每一个迭代步变量修正后,无法判断不等式约束是否越界,但是如果不能确定那些越界的不等式(起作用的不等式约束集)就无法形成罚函数,而且引入的罚函数对 Hessian 阵的部分对角元素有影响,会明显改变计算结果。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。

牛顿法中,起作用的不等式约束集通常用试验迭代来确定,增加了计算的难度和复杂性。针对此问题,文献 [20] 提出用线性规划技术取代试验迭代来进行起作用的不等式约束集的识别,避免使用试验迭代。文献 [21] 提出在不等式约束处理过程中考虑优先级策略,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。文献 [22] 提出快速预估起作用不等式约束集方法。而文献 [8] 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。

牛顿法另一个难题是: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。针对这一问题,文献 [23] 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。文献 [24] 用一种改进的软惩罚策略处理牛顿法中基本迭代矩阵的“病态”问题,根据电网拓扑结构,将有越限的母线分成多层,每一层选取一比较严重的节点进入起作用的不等式约束集,按各层搜索到所有节点,这种方法相对节省迭代数,提高了牛顿 OPF 算法的收敛性和计算速度。

Newton 最优潮流优点在于:利用了二阶导数信息,收敛快,使用稀疏技术节省内存,可用于大规模网络。缺点是:难以有效确定约束集,普遍用试验迭代法,编程实现困难;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;引入的 Lagrange 乘子的初值对迭代计算的稳定性影响大。

1.2.4 内点法 IP (Interior Point Algorithm)

内点法最初是作为一种线性规划算法,是为了解决单纯形法计算量随变量规模急剧增加而提出来的。内点法从初始内点出发,沿着可行方向,求出使

目标函数值下降的后继内点,沿另一个可行方向求出使目标函数值下降的内点,重复以上步骤,从可行域内部向最优解迭代,得出一个由内点组成的序列,使得目标函数值严格单调下降。其特征是迭代次数和系统规模无关。

内点法原用于求解线性规划问题,现在该方法已被扩展应用于求解二次规划和非线性规划模型,可以用来解最优潮流问题。和牛顿法相比,由于内点法在可行域内部向最优解迭代,没有识别起作用的约束集的困难。

内点法有三种:投影尺度法、仿射变换法、路径跟踪法。投影尺度法在 OPF 问题中性能较差,在实际应用中很少使用;而仿射尺度法和原一对偶内点算法使用较广。由于对偶仿射尺度法在确定初始内点可行解比较复杂,并且在最优点附近收敛速度较慢,限制了该方法在解决 OPF 问题中的应用;而原一对偶内点算法由于其收敛迅速,鲁棒性强,对初值的选择不敏感,是目前研究最多的内点算法,该算法现已推广应用到二次规划领域,并正被进一步发展用于研究一般非线性规划问题。

文献 [26] 提出了基于对数障碍函数的原一对偶内点法来完成系统的优化,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。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 [28] 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。

文献 [27] 中提出了预报—校正原对偶内点法解非线性最优潮流问题,提出了提高带有预测—校正机制的原一对偶内点算法解算性能的若干策略。将直接的原一对偶内点法的结果作为预报值,将系统形成一个固定的稀疏对称系数的方程组。该方法的计算量小。其结果与原一对偶内点法 OPF 的结果相比,计算速度快,收敛性好,处理病态问题能力强。

内点法用于解线性 OPF 模型的研究有:

文献 [25] 提出一种对偶仿射尺度法来解决电力系统优化的问题。该问题被描述成一个线性规划数学模型。这种方法能够处理有大量约束的优化问

题,它的缺点是适合处理不等式约束的优化问题,对等式约束需要进行转换。

文献 [30]将对偶仿射尺度法扩展到直接求解非标准形式的线性规划模型,并采用了步长动态调整技术和约束松弛技术。文献 [32]用原一对偶仿射尺度法来求解无功优化的线性规划模型,文献 [33]在文献 [32]的基础上将模糊集理论和非线性原一对偶路径跟踪内点法应用于求解具有可伸缩约束的多目标最优潮流问题。

内点法解二次规划 OPF模型的研究有:

文献 [29]提出了一种基于改进初始条件的扩展二次内点算法 (EQIP)求解 OPF问题,文献 [31]中提出了基于一般初始点的改进二次内点算法 (QIP)。文献 [34]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。

内点法的缺点在于:基于原一对偶内点算法的对偶变量初值的选取和障碍参数的修正需要人为根据经验给出,无一般规律可循;用牛顿法进行迭代求解时需要严格控制步长以使得迭代中间变量在可行域之内,离散变量的处理以及优化后的灵敏度分析等问题仍待进一步研究等。

2.2.5 无限点优化算法 UP (Unlimited Point Algorithm)

无限点优化算法可以看作内点法的改进,基于原一对偶内点算法的内点法由前面的分析可知具有以下特点: 对于不等式约束的处理是:使用松弛变量将不等式约束变为等式约束; 其所有约束变量的迭代初始值,包括松弛变量,必须在可行域之内; 在原目标函数基础上增加障碍函数(一般为对数障碍函数); 使用牛顿法求解 KKT条件方程过程中必须使用一种严格的计算方法逐步减小障碍参数(一般使用对偶间隙法),需要控制迭代步长以保持解的可行性。由于障碍参数和步长的确定对优化的影响较大,对于它们的确定成为限制内点法的主要因素。

鉴于以上因素,1999年,Giorgio Tognola, Rainer Bacher在内点法的基础上,结合牛顿法的特点,提出了一种新的无功优化算法:无限点算法 (Unlimited Point Algorithm)^[36]。无限点优化算法使用了新的不等式约束变换方法,使得不等式约束完全变化为等式约束,变量空间相应地变换为无约束空间。这

就是无限点算法名称的由来。

对于 所描述的优化问题可以由 Lagrange乘子将约束加到目标函数中:

$$L(x, \mu, z) = F(x) + \mu^T g(x) + z^T h(x)$$

引入松弛变量 z 将不等式约束转为等式约束:

$$h(x) + z = 0$$

$$z \geq 0$$

由 Karush-Kuhn-Tucker理论可知在满足所有约束 $F(x)$ 的极值点处, μ 满足下面的方程组:

$$\frac{\partial L}{\partial x} = \frac{\partial L}{\partial x} (F(x) + \mu^T g(x) + z^T h(x)) = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = g(x) = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial z} = h(x) = 0$$

$$\text{diag}\{\mu\} \frac{\partial L}{\partial \mu} = \text{diag}\{\mu\} h(x) = -\text{diag}\{\mu\} z = 0$$

$$\mu \geq 0$$

$$z \geq 0$$

这里 $\mu \geq 0$ 和 $z \geq 0$ 是仅有的不等式约束条件。 μ 和 z 必须为正数或零。由此我们可以用非负表达式来代替这两个变量:

$$\mu_i \Rightarrow \mu_i^{2s}, \quad z_i \Rightarrow z_i^{2r}$$

式中: s, r 为不等于零的整数。

将上述变换带入原优化条件:

$$\frac{\partial L}{\partial x} (F(x) + \mu^T g(x) + (\mu^{2s})^T h(x)) = 0$$

$$g(x) = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = h(x) + \frac{2s}{z_i^{2r}} = 0 \quad (2)$$

$$\text{diag}\{\mu_i^{2s}\} \frac{2s}{z_i^{2r}} = 0$$

经过转换后,优化条件方程不含显式的不等式约束,优化过程也不需特意保持在可行解空间内寻优。独立变量 μ_i^{2s} 和 z_i^{2r} 不受限制,可以为正也可以为负。在得到一个解后可以通过 $\mu_i^{orig} = \mu_i^{2s}, z_i^{orig} = z_i^{2r}$ 计算原来的值。

方程组 (2)可以使用常规的牛顿-拉普逊法求解。这一点和内点法类似,但是不同的是,这里不再需要步长控制以保持解在可行域内,由于没有障碍函数,也不用考虑障碍函数参数。

该方法的特点是变量空间无限制,内点法和之相比,变量空间是受内部约束限制的。

文献 [36]用 UP算法在 IEEE14、30、57、118和 24、41、73节点 CIGRE系统和一个 685系统进行了试验,同时还对不同的 μ 和 z 的初值的影响进行了

比较。各个网络在默认参数下均能很好地收敛,同时具有内点法计算时间和网络规模仅随网络规模线性增加的优点。

UP法的问题在于对 μ 和 λ 的选择比较敏感,选择不当会对收敛有一定影响。

2 遗传算法

遗传算法是80年代出现的新型优化算法,近年来迅速发展,它的机理源于自然界中生物进化的选择和遗传,通过选择(Selection)、杂交(Crossover)和变异(Mutation)等核心操作,实现“优胜劣汰”。它的主要特点是:可从多初值点开始,沿多路径搜索实现全局或准全局最优;可方便地处理混合整数离散性问题;是一种有效的自适应优化方法。

GA应用于潮流优化问题时,一般步骤为:首先随机给出一组初始潮流解,受各种约束条件约束,然后通过目标函数评价其优劣,然对其编码,通过遗传操作——选择、杂交和变异,使其重新组合,评价低的被抛弃,只有评价高的有机会将其特征迭代至下一轮解,最后这码串对应的解将趋向优化。

遗传算法优点是具有很好的全局寻优能力,优化结果普遍比传统优化方法好。缺点是计算量比较大,计算时间长。现在遗传算法的研究主要集中在以下两方面:通过改进目标函数计算方法以提高其计算速度,通过改进遗传算法的操作改进整体收敛性和寻优性能。

在遗传算法操作研究方面,文献[38]在一个103节点系统上研究了使用不同的算子参数对迭代次数和优化结果的影响,还研究了控制变量约束的影响,建议在寻优过程中不断缩小解空间。文献[39]研究了多种用于提高GA效率及精度的方法,表明同时变罚因子及变权重因子的GA应用于经济调度中最有效,它最能保证收敛精度,虽然它牺牲了一些收敛时间。文献[40]使用了有指导性的变异操作,减小了群体规模,提高了计算速度。

针对目标函数计算加速,也就是潮流计算加速,文献[37]将潮流方程中PV节点转为V节点作为控制变量,同时将网络按节点联系进行分层,以形成一个带状稀疏阵,然后针对网络分层的特点使用一种高效的改进高斯消去法求解线性方程组。在IEEE57、118、300和KT896、ESM试验网络上的对比计算表明其方法的速度比PQ解耦潮流算法要快。

此外,GA还用于解决含电力电子设备的灵活交流输电系统这样的非凸性的优化。文献[41, 42,

50]对此进行了研究,结果表明遗传算法在这种非线性、非光滑、不可微的函数优化上十分适合。

3 优化潮流的并行化计算

随着电力系统规模的扩大和日益增加的安全稳定性要求,如何快速、实时地计算OPF成为一个十分紧迫的课题。现有的OPF算法的计算速度均难以满足大型网络的实时性需要。并行计算可以提高现有计算机的计算能力,提高计算速度。最优潮流并行算法是利用待求解问题的并行性通过多个处理器协作完成问题的求解。并行计算的硬件可以是专门的并行计算机,也可以是分布式网络计算环境。

文献[43]在无限点算法的基础上,使用了Newton-Krylov并行化算法求解非线性方程组,在IEEE5、30、118系统进行计算,算法在共享内存计算机、分布内存超级计算机和网络集群计算环境下进行。结果表明所使用的方法在各种环境下均具有良好的加速性能。

文献[47]将遗传算法并行化,通过将目标函数的计算分派给各个处理器来实现并行,遗传的操作在主机中进行。试验计算得到的主机效率在80%以上。

文献[48]定性研究了粗粒度模型并行遗传算法中迁移策略参数对算法性能的影响,这些参数包括:子种群数目、迁移率、迁移规模、迁移选择策略和通信方式等。得到的结论是PGA在高迁移率下容易找到最优解;子种群数目越大,找到最优解的评估次数就越少;在同步迁移和异步迁移下,PGA在不同迁移周期下的算法性能基本相似,采用随机选择的迁移选择策略好于最佳选择的迁移选择策略。

文献[44]对分解协调法(decomposition coordination)这类并行最优潮流算法进行了比较研究。分解协调法是一类将网络分块进行计算的方法,属于粗颗粒的空间并行算法。分解协调法有辅助问题法APP(Auxiliary Problem Principle)、预测校正极大乘子法PCPM(Corrector Proximal Multiplier Method)、交替方向法ADM(Alternating Direction Method)三大类。国内关于APP法的研究有文献[45, 46]。

4 总结

目前OPF已经向大系统、实时控制、在线计算方向发展,电力市场的出现也为OPF提出了新的要求。在实时电价计算、阻塞管理、输电费用计算、辅助费用计算等方面OPF都有应用^[49]。对于灵活交

流系统下的 OPF 问题也有待深入研究。考虑负荷变动和系统故障情况下的动态优化潮流问题也是值得研究的。所有这一切都要求 OPF 的计算速度更快、收敛性更好、鲁棒性更强。随着计算机硬件、软件水平的提高和新型算法的出现,OPF 的问题仍有深入研究的必要,以满足新环境下电力系统的要求。

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] Wells D W. Method for Economic Secure Loading of a Power System[J]. Proceedings of IEEE, 1968, 115(8): 606-614.
- [3] Shem C M, Laughton M A. Power System Load Scheduling with Security Constraints Using Dual Linear Programming[J]. Proceedings of IEEE, 1970, 117(1): 2714-2127.
- [4] Stott B, Marinho J L. Linear Programming for Power System Network Security Applications[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, 117(1): 2714-2127.
- [5] Santos-Neito M, Quintana V H. Linear Reactive Power Studies for Longitudinal Power Systems[A]. 9th PSCC Conference 1987. 183-787.
- [6] Mamandur K R C, Chenoweth R D. Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvements in Voltage Profiles and for Real Power Loss Minimization[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100: 3185-3193.
- [7] Rama S, Rama I K, Haraharan C S. Optimal Reactive Power Allocation for Improved System Performance[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100: 3185-3193.
- [8] Mamandur K R C, Chenoweth R D. Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvements in Voltage Profiles and for Real Power Loss Minimization[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100: 3185-3193.
- [9] Mamandur K R C, Chenoweth R D. Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvements in Voltage Profiles and for Real Power Loss Minimization[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100: 3185-3193.
- [10] Bartholomew Biggs M C. Recursive Quadratic Programming Methods Based on the Augmented Lagrangian[J]. Mathematical Programming Study, 1987, 31: 21-41.
- [11] 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, 15(4): 52-57.
- [12] CHENG Hao-zhong. Optimal Real Power Flow for Power System via Equivalent Quadratic Programming Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 1991, 15(4): 52-57.
- [13] Alsac O, Scott B. Optimal Load Flow with Steady-State Security[J]. IEEE Trans on PAS, 1974, 93: 745-751.
- [14] Peschon J, Bree D W, Hajdu L P. Optimal Solutions Involving System Security[A]. Proc of PICA Conf 1971. 210-218.
- [15] Wu F F, Gross G F, et al. A Two Stage Approach to Solving Large Scale Optimal Power Flows[A]. Proc of PICA Conf Cleveland: 1979.
- [16] 刘学东, 王磊, 余耀. 最优潮流改进简化梯度法的研究及应用[J]. 山东电力技术, 2003, (11): 19-22.
- [17] LU Xue-dong, WANG Lei, YU Yao. The Research and Application of Improved Simplifying Gradient Algorithm in the Optimal Power Flow[J]. Shandong Electric Power, 2003, (1): 19-22.
- [18] Cova B, Granelli G P, Montana M, et al. Large Scale Application of the Han-Powell Algorithm to Compact Models of Static and Dynamic Dispatch of Real Power[J]. Int Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1987, 9(3): 130-141.
- [19] Giras T C, Talukdar S N. Quasi-Newton Method for Optimal Power Flows[J]. Int Journal of Electrical Power and Energy Systems, 1981, 3(2): 59-64.
- [20] Scott B, Alsac O, Monticelli A J. Security Analysis and Optimization[J]. Proc of IEEE, 1987, 75(12): 1623-1644.
- [21] Sun D I, Ashley B, Brewer B, et al. Optimal Power Flow by Newton Approach[J]. IEEE Trans on PAS, 1984, 103(10): 2864-2880.
- [22] Maria G A, Findlay J A. A Newton Optimal Power Flow Program for Ontario Hydro EMS[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(10): 576-584.
- [23] 郝玉国, 张靖, 于尔铿, 等. 最优潮流实用化研究[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(6): 388-391.
- [24] HAO Yu-guo, ZHANG Jing, YU Er-keng, et al. Achievements of Practical Optimal Power Flow[J]. 1996, 16(6): 388-391.
- [25] Crisan O, Mohtadi M. A Efficient Identification of Buliding Inequality Constraints in Optimal Power Flow Newton Approach[J]. IEEE Proceedings—Gener, Transm and Distrib, 1992, 139(5): 365-370.
- [26] Monticelli A, LU Wen-hsuing E. Adaptive Movement Penalty Method for the Newton Optimal Power Flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 334-

- 340
- [24] 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.
ZHAO Jin-quan, HOU Zhi-jian, WU Ji-shun. Some New Strategies for Improving the Effectiveness of the Newton Optimal Power Flow Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(12): 70-75.
- [25] Ponnambalam K, Quintana V H, Vannelli A. A Fast Algorithm for Power System Optimization Using an Interior Point Method [A]. Power Industry Computer Application Conference. Conference Proceedings 1991. 393-400.
- [26] Granville S. Optimal Reactive Dispatch through Interior Point Method [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 136-146.
- [27] WU Yu-chi, Debs A S, Marsten R E. 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.
- [28] 郝玉国,刘广一,于尔铿.一种基于Kamarkar内点法的最优潮流算法[J].中国电机工程学报,1996,16(6):409-412.
HAO Yu-guo, LIU Guang-yi, YU Er-keng. A New OPF Algorithm Based on Kamarkar's Interior Point Method [J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(6): 409-412.
- [29] Momoh J A, Guo S X, Ogbuobiri E C, et al. The Quadratic Interior Point Method Solving Power System Optimization Problems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1327-1336.
- [30] 张小平,陈朝晖.基于内点法的安全约束经济调度[J].电力系统自动化,1997,21(6):27-29.
ZHANG Xiao-ping, CHEN Chao-hui. Security-constrained Economic Dispatch through Interior Point Methods [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(6): 27-29.
- [31] Momoh J A, Zhu J Z. Improved Interior Point Method for OPF Problems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 1114-1120.
- [32] 刘明波,陈学军.基于原对偶仿射尺度内点法的电力系统无功优化算法[J].电网技术,1998,22(3):33-36.
LIU Ming-bo, CHEN Xue-jun. Primal-Dual Affine Scaling Interior Point Method Based Reactive Power Optimization in Power Systems [J]. Power System Technology, 1998, 22(3): 33-36.
- [33] 刘明波,陈学军.电力系统无功优化的改进内点算法[J].电力系统自动化,1998,22(2):33-36.
LIU Ming-bo, CHEN Xue-jun. Improved Interior Point Method for Reactive Power Optimization in Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(5): 33-36.
- [34] Manoh J A, Dias L G, Guo S X, et al. Economic Operation and Planning of Multi-area Interconnected Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 1044-1053.
- [35] Manoh J A, Dias L G, Guo S X, et al. Economic Operation and Planning of Multi-area Interconnected Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 1044-1053.
- [36] Tognola G, Bacher G. Unlimited Point Algorithm for OPF Problems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 1046-1054.
- [37] Todorovski M, Rajicic D. A Power Flow Method Suitable for Solving OPF Problems Using Genetic Algorithms [A]. Ljubljana: (Slovenia) 2003.
- [38] 周双喜,杨彬.影响遗传算法性能的因素及改进措施[J].电力系统自动化,1996,20(7):24-27.
ZHOU Shuang-xi, YANG Bin. Factors of Effect on the Performance of Genetic Algorithm Applied to the Power Optimization and the Methods to Perfect It [J]. Automation of Electric Power system, 1996, 20(7): 24-27.
- [39] Sheble G B, Kristin. Refined Genetic Algorithm-Economic Dispatch Example [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(1).
- [40] MENG Xiang-pin, LIANG Zhi-shan, ZHAO Huan-guan. Fast Synthetic Genetic Algorithm and Its Application to Optimal Control of Reactive Power Flow [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13: 1454-1458.
- [41] 钟德成,李渝曾.柔性交流输电系统潮流计算中改进的遗传算法[J].电力系统自动化,2000,24(1):48-50.
ZHONG De-cheng, LI Yu-ceng. Improved Genetic Algorithm Used in Optimal Power Flow Control with FACTS Devices [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1): 48-50.
- [42] Lai L L, Ma J T. Power Flow Control in FACTS Using Evolutionary Programming [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10: 109-113.
- [43] Huang Y, Kashivagi T, Morozumi S. A Parallel OPF Approach for Large-scale Power Systems [J]. Power System Management and Control, 2002: 162-166.
- [44] Kim B H, Baldick R. A Comparison of Distributed Optimal Power Flow Algorithms [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2).
- [45] 程新功,厉吉文,曹立霞,等.基于电网分区的多目标分布式并行无功优化研究[J].中国电机工程学报,2003,23(10):109-113.

- CHENG Xin-gong, LI Ji-wen, CAO Li-xia, et al Multi-Objective Distribute Parallel Reactived Power Optimization Based on Subarea Division of the Power Systems [J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23 (10): 109-113
- [46] 程新功, 厉吉文, 曹立霞, 等. 电力系统最优潮流的分布式并行算法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (24): 23-27.
- CHENG Xin-gong, LI Ji-wen, CAO Li-xia, et al Distribute and Parallel Optimal Power Flow Solution of Electronic Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (24): 23-27.
- [47] 潘哲龙, 张伯明, 孙宏斌, 等. 分布计算的遗传算法在无功优化中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (12): 37-41.
- PAN Zhe-long, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin, et al A Distributed Genetic Algorithm for Reactive Power Optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (12): 37-41.
- [48] 曹一家. 并行遗传算法在电力系统经济调度中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (13): 1-7.
- CAO Yi-jia Application of Parallel Genetic Algorithms to Economic Dispatch [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (13): 1-7.
- [49] 丁晓莺, 王锡凡. 最优潮流在电力市场环境下的最新发展 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (13): 1-7.
- DING Xiao-ying, WANG Xi-fan Recent Development of Optimal Power Flow on Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (13): 1-7.
- [50] Leung H C, Chun T S Optimal Power Flow with a Versatile FACTS Controller by Genetic Algorithm Approach [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15: 2806-2811.

收稿日期: 2004-09-16; 修回日期: 2004-11-25

作者简介:

万黎 (1980 -), 男, 博士, 从事电力系统计算方向的研究; E-mail: wanli_me@tom.com

袁荣湘 (1965 -), 男, 副教授, 从事电力系统保护方向的研究。

A summary of optimal power flow

WAN Li, YUAN Rong-xiang

(School of Electric Power Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Optimal power flow is a method that makes power system running with economy and security by changing the values of control variables. It is hard to realize because of the complexity of mathematical modeling and security constraints. This paper summarizes several main aspects of optimal power flow nowadays and discusses some of its further development.

Key words: optimal power flow; linear programming; Newton method; interior method; genetic method; parallel method

强强联手 共赢未来

—陕西名企陕西鼓风机(集团)入驻总部基地

2005年5月11日,陕西名企陕西鼓风机(集团)有限公司与总部基地签订了入驻协议,正式进驻总部基地,旨在借助总部基地这一平台,进一步打造企业的品牌影响力及参与国内外竞争的核心竞争力;而总部基地也通过引进陕西鼓风机集团这样的国家重点企业进驻,加强了企业总部集聚的整体效应以及总部之间的信息互动、资源共享和群体优势,从而促进北京大总部经济区的形成。

陕西鼓风机集团是国内定点生产透平鼓风机、压缩机的大型骨干企业,是陕西省、市重点骨干企业。陕西鼓风机集团有关负责人表示,随着企业的不断发展和全球经济一体化的加快,集团的战略升级也显得日益紧迫。对于任何一个“立足国内,走向世界”的企业来说,北京是一个绝佳的窗口和平台,而北京总部基地作为企业总部的聚集地,更处于总部经济核心空间载体的地位。陕西鼓风机集团将充分利用北京的区位优势、人才优势、信息优势,进一步实现及深化自身的发展战略。

“北京总部基地的总部效应已经开始显现出来。北京总部基地董事长许为平表示,“目前签约入驻总部基地的企业已有一百多家,除陕西鼓风机集团以外,还有大连冰山、正泰集团、新疆特变、中国诚通、中华通讯、航天科技、建龙钢铁、中牧股份等国内诸多行业的龙头企业。越来越多的有实力的大型企业将总部迁入北京、聚焦总部基地,一方面说明我国企业的国际竞争意识在不断加强;另一方面也显示出我国企业的联盟意识正在发生变化,从国际经验来看,这是一种走向成熟的表现。”