

牛顿法优化潮流的实用化研究

王永刚¹, 柳焯²

(1. 许昌继电器研究所, 河南 许昌 461000; 2. 哈尔滨工业大学电气系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

【摘要】 在简要回顾优化潮流发展历史的基础上, 结合牛顿法优化潮流在实用化过程出现的若干问题, 提出了相应的解决策略。

【关键词】 牛顿法; 优化潮流; 实用化

1 概述

优化潮流的研究开始于本世纪60年代初, 当时电力系统广泛应用的是经典优化调度方法, 但一些系统相继发生大面积停电事故, 提醒人们在追求经济效益的同时必须考虑系统的安全性。Carpentier和Sirous在优化调度中引入了安全约束, 延伸了优化调度的概念, 提出以优化潮流来统筹考虑调度中的经济性与安全性。从那时开始, 优化潮流逐渐为广大电力研究工作所重视, 并相继提出了多种算法^[1-6]。由于牛顿法在收敛性方面的优势, 使其一直是研究的一个重点。1984年, 文^[3]在牛顿法优化潮流方面取得了较大的进展, 为其实用化打下了基础。

1990年, 文^[6]在证明了优化潮流与经典经济调度相通性的基础上, 解决了牛顿法优化潮流中海森阵的合理常数化问题, 提出了快速解耦优化潮流算法。1997年, 文^[7]将动态瓶颈约束引入传统的优化潮流, 形成了动态优化潮流的数学模型, 并以牛顿法优化潮流为例, 提出了动态优化潮流的算法, 使优化潮流从静态地处理单个时间断面, 发展到动态地跟踪有功、无功峰谷起落的新阶段。

无功优化问题是优化潮流研究的一个重要方面。一般地讲, 牛顿法优化潮流也可以用来解决无功优化潮流问题。1998年, 以牛顿法优化潮流为基础的“基于运行模式的无功优化调度”软件包在我国某系统已经开始进入实用化试运行阶段。

本文结合牛顿法优化潮流在实用化过程中出现的若干问题, 提出了相应的对策和解决方法。

2 优化潮流的数学模型

电力系统优化潮流是在满足节点有功、无功功率平衡和各种不等式约束条件的情况下, 使总费用最小。一般优化潮流的数学模型如下:

目标函数:

$$\min F(\underline{P}_g) = \sum_{i=1}^{NG} f_i(P_i) \quad (1)$$

其中, $F(\underline{P}_g)$ 为总费用, 万元/分钟;

\underline{P}_g 是各发电机组有功功率组成的向量;

NG 为发电机组总数;

P_i 为第 i 台机组的输出功率, MW;

f_i 为第 i 台机组的费用特性, 万元/分钟。

本文取为

$$f_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (1)$$

a_i, b_i, c_i 为常数。

等式约束为潮流方程, 即:

$$\underline{g}(\underline{X}, \underline{Y}) = 0 \quad (2)$$

其中, $\underline{X}, \underline{Y}$ 为状态变量向量和控制变量向量;

0 为由 0 组成的向量。

不等式约束条件包括发电机组的功率约束, 节点的电压约束, 变压器的变比约束, 元件的过载约束等, 它们分别为:

$$\left. \begin{array}{llll} P_{gi, \min} & P_{gi} & P_{gi, \max} & i \quad NG \\ Q_{gi, \min} & Q_{gi} & Q_{gi, \max} & i \quad NG \\ V_{i, \min} & V_i & V_{i, \max} & i \quad n \\ t_{ij, \min} & t_{ij} & t_{ij, \max} & i \quad NT \\ P_{ij} & P_{ij}^{\max} & & ij \quad NL \end{array} \right\} \quad (3a \sim 3e)$$

其中, n 为系统的节点数, NT, NL 分别表示有载调整分接头的变压器数和有功传输功率约束的线路和变压器元件数。

以上的不等式约束可以综合为如下向量形式:

$$\underline{U}^{\min} \leq \underline{U}(\underline{X}, \underline{Y}) \leq \underline{U}^{\max} \quad (4)$$

其中, $\underline{U}(\underline{X}, \underline{Y})$ 为发电机组功率、线路功率等对 $\underline{X}, \underline{Y}$ 的函数向量;

$\underline{U}^{\max}, \underline{U}^{\min}$ 分别为 $\underline{U}(\underline{X}, \underline{Y})$ 的上、下限向量。

这样, 优化潮流就归结为在等式约束(2)及不等式约束(3a~3e)的条件下求目标函数(1)极小值的

非线性规划问题。在这一问题中所涉及的变量包括各发电机组的有功功率和无功功率,所有节点的电压幅值和相位以及各调压变压器的变化等。

3 牛顿法优化潮流的实用化策略

优化潮流中的不等式的约束是其重点与难点,实用化策略也将围绕这一重点与难点。目前对不等式约束较常用的处理方法有罚函数法、线性规划法以及内点法等。本文主要结合罚函数法和线性规划法讨论优化潮流实际应用中不等式约束的处理方法。

实际计算显示,罚函数法和线性规划法在解决优化潮流问题时各有优缺点,一般都难以完全胜任各类情况。但同时也发现,如果能够针对电力系统的实际情况,将两者结合起来使用,则可以取长补短,取得比较理想的效果。

(1) 发电机有功功率和无功功率约束用变目标函数法来实现。

在优化潮流的计算过程中,一般目标函数与活动约束集(即由起作用的约束构成的集合)的作用是相反的。目标函数的作用是使系统向最优的运行方式靠近,但由于系统设备的运行参数等的限制(以不等式约束的形式来表达),这种最优的运行方式是难以达到的。约束函数在这里就限制了系统的运行方式向最优点的靠拢。而且发电机的经济性越好,约束的限越“紧”,这种目标函数与约束之间的矛盾就越突出,这也是减缓算法收敛速度或造成算法不收敛的原因之一。

仔细研究电力系统优化潮流数学模型可以知道,目标函数中有功率前的系数是使相应发电机向其损耗最小方向靠近的原动力。因此,如果根据系统中发电机的越限情况,将不等式约束中发电机有功功率约束转化为目标函数中使越限发电机向限值靠近的“动力”,即使约束也以目标函数中分量的形式出现,则可以部分杜绝前面提到的问题。具体做法是:

假设在迭代过程中发现发电机 k 的有功功率越上限,则以罚函数的形式在目标函数中加入一项,新目标函数为:

$$\min F(\underline{P}_g) = \sum_{i=1, i \in NG} f_i(P_i) + f_k(P_k) + r_k(P_k - P_{k, \max})^2 \quad (5)$$

其中, r_k 为罚因子。

考虑到(1)形式的目标函数,将式(5)中的后两

项合并,则(5)式化为:

$$\min F(\underline{P}_g) = \sum_{i=1, i \in NG} f_i(P_i) + (c_i + r_k) P_k^2 + (b_k - 2r_k P_{k, \max}) P_k + (c_k + r_k P_{k, \max}^2) \quad (6)$$

这样,在下次迭代中,即可通过对目标函数的修正实现不等式约束的处理。这里需要注意的是进入目标函数的发电机有功功率约束集还会在迭代过程中变化。如果发现进入目标函数的发电机有功功率在某次迭代后的值仍越相应的限(当然通过对目标函数的修正,越限幅度不会很大),则不做改动,若恢复到限内,则使其退出目标函数,即恢复相应目标函数中发电机有功功率原来的系数,这就是变目标函数法。

在优化潮流的实用化过程中还发现,系统中的无功分布对系统运行的经济合理与否以及算法的收敛性也有较大的影响。因此,在强调系统有功功率优化的同时,还应该考虑无功功率的优化,如使系统的无功损耗尽可能小,即在目标函数中仿照发电机有功功率的做法也加入发电机无功功率费用项。一般为强调系统有功费用的极小化,目标函数中无功功率前的系数在取值时要较相应的发电机有功功率的小一些。这样做的另一个好处是对于发电机组无功输出功率约束也可以采取与有功功率类似的变目标函数法,具体做法与上类似,这里就不再赘述了。

(2) 在约束集中增加机组功率因数约束。

在电力系统实际运行中,除了对发电机的无功功率有上下限约束之外,相当的部分是要保证发电机的功率因数运行于一定的范围之内,并以实际运行中各电业局、变电站的功率因数情况作为其考核指标和无功设备配置的备选点,因此,优化潮流程序中应能够处理发电机的功率因数约束。由于优化潮流在处理过程中可以将发电机有功功率和无功功率都作为状态量来处理,因此这种处理也相对简单,首先将功率因数约束作一简单的变形,有:假设第 i 台发电机的功率因数需要约束,即

$$\cos \theta_i^{\min} \leq \cos \theta_i \leq \cos \theta_i^{\max} \quad (7)$$

由于 $\cos \theta_i = P_i / \sqrt{P_i^2 + Q_i^2}$

将其代入式(7)并分为两个不等式约束并整理,则有

$$P_i - Q_i \tan \theta_i^{\max} \leq 0 \quad (8a)$$

$$P_i - Q_i \tan \theta_i^{\min} \geq 0 \quad (8b)$$

这样,这一约束就与式(3a ~ 3e)中给出的形式相一致,也可以方便地用线性规划法来处理。

(3) 电压约束采用罚函数法与线性规划法相结合的方法来处理。

电压约束是优化潮流中最多的约束。这一约束群的处理直接影响着优化潮流的收敛性和收敛速度。在优化潮流的算法中一般采用罚函数法或线性规划法来处理。但这两类方法都存在着一些问题。比较实用的方法是,首先在目标函数中加入节点电压罚函数,则式(1)变为:

$$\min F(\underline{P}_g) = \sum_{i=1, i \in NG} f_i(P_i) + \sum_{k=1}^n r_k (V_k - V_{k, \text{normal}})^2 \quad (9)$$

其中, r_k 为罚因子;

$V_{k, \text{normal}}$ 是节点 k 的正常运行电压,对于无约束节点其标么值取 1.0,对于有约束节点其标么值取 $\frac{V_{i, \text{max}} + V_{i, \text{min}}}{2}$ 。

加入罚函数后,即可使迭代过程中的节点电压向正常值靠近,这样做之后,一方面可以显著减少迭代过程中节点电压的越限情况;另一方面,对那些仍越限的节点电压,其越限的幅度也可明显减小,对这些电压再用选取带头约束的线性规划法进行处理,即可避免对单纯采用线性规划法处理时出现相关约束和状态量循环进基、出基的死循环现象,并明显节省计算时间。其中罚因子在取值时不要求很大,一般在 1~10 之间就可以了。

(4) 变压器分接头约束和元件传输有功功率约束采用线性规划法来处理。

经过以上的处理,优化潮流数学模型中完全需要用线性规划法来处理的不等式约束只剩下变压器分接头约束和元件传输有功功率约束了。一般来说,这两类约束相对较少,而且也不会发生相关约束,所以可以直接采用线性规划法来处理。

(5) 对负荷端的降压变压器进行等值处理。

系统中的负荷都通过降压变压器与高压网相连,由于在大型电网中这些降压变压器为数众多,如果在网络数据中考虑所有的负荷端降压变压器,将使系统的节点数剧增,影响计算速度和收敛性。同时这些降压变压器对系统的无功调度影响较大,所以忽略其影响的做法也是不可取的。在优化潮流中,负荷端降压变压器可以通过等值技术来加以考虑。具体做法如下:

负荷通过降压变压器与高压母线相连的线路图和将负荷等效为阻抗的等效电路图如图 1 所示。图中粗线即为高压母线。

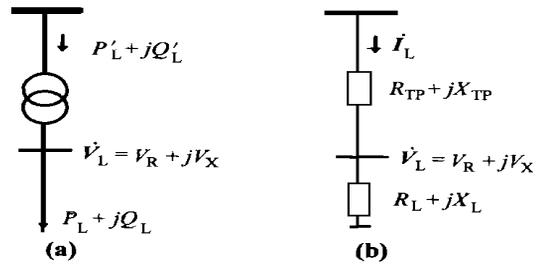


图 1 负荷端连接方式图

设负荷 $P_L + jQ_L$ 的功率因数为 \cos , 则有:

$$\text{tg} = X_L / R_L \quad (10)$$

$$P_L = I_L^2 R_L = \frac{\dot{V}_L^2}{R_L} \cos^2 \quad (11)$$

由以上两式可得:

$$R_L = \frac{\dot{V}_L^2}{P_L} \cos^2 \quad (12)$$

$$X_L = \frac{\dot{V}_L^2}{P_L} \cos^2 \text{tg} \quad (13)$$

设考虑了变压器的修正负荷 $P_L + jQ_L$ 的功率因数为 \cos , 则当忽略了变压器的电阻 R_{TP} 时,根据以上两式可得:

$$\text{tg} = \frac{Q_L}{P_L} = \frac{Q_L}{P_L} = \frac{X_L + X_{TP}}{R_L} = \text{tg} + \frac{P_L}{\dot{V}_L^2} X_{TP} \sec^2 \quad (14)$$

所以:

$$Q_L = P_L \text{tg} + \frac{P_L^2}{\dot{V}_L^2} X_{TP} \sec^2 \quad (15)$$

在实际计算时,一般可以假定 $\dot{V}_L = 1$,而负荷前变压器的参数是已知的,因此,可以建立其相应的模式库,并用 $P_L + jQ_L$ 来模拟负荷前变压器的影响,计算时一般可以忽略变压器的有功损耗。

4 结论

本文在简要回顾优化潮流的发展历史的基础上,结合牛顿法优化潮流在实用化过程出现的问题,提出了相应的解决方法。采用本文方法的软件包在某大系统无功优化中的应用表明,本文方法是有效的。

[参考文献]

- [1] Dommel H W, Tinney W F. Optimal Power Flow Solutions. IEEE on Power Apparatus and Systems. 1968, PAS-87(10): 1866-1876.
- [2] Fletcher R. Optimal Electric Power Scheduling by Use of a Multiplier Penalty Function Method. PSCC. 1978, 1: 502-508.

(下转第 12 页)

量阻抗继电器、正序故障分量方向继电器和正、负序综合故障分量方向继电器在 T 接线路中应用的性能进行了仿真计算与分析可知, T 接线路的继电保护有它的独特之处, 普通线路中性能良好的保护不一定适合 T 接线路。随着电力系统的不断发展, 特别是城市电网的发展, T 接线路将进一步增加, 对 T 接线路继电保护的研究, 还有待进一步深入和加强。

[参考文献]

- [1] 袁荣湘等. T 接线路故障仿真计算与分析. 电力自动化设备, 1999, (1).
- [2] Dommel H W 著, 李永庄等译. 电力系统电磁暂态计算理论. 水利电力出版社, 1990.
- [3] 中华人民共和国电力行业标准 DL/T 625—1997. LFP—

900 系列超高压线路成套快速保护装置检验规程.

- [4] 陈德树主编. 计算机继电保护原理与技术. 水利电力出版社, 1992. 11.
- [5] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术 (第二版). 水利电力出版社, 1995. 8.
- [6] 葛耀中著. 新型继电保护与故障测距原理与技术. 西安交通大学出版社, 1996. 8.

收稿日期: 1999—01—20

作者简介: 袁荣湘 (1965 -), 男, 讲师, 博士生, 从事电力系统保护与控制的科研教学工作; 陈德树 (1930 -), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统继电保护与自动化的科研教学工作。

SIMULATION AND ANALYSES OF THE PERFORMANCE OF DIRECTIONAL RELAYS ON TEED LINE

YUAN Rong-xiang, CHEN De-shu, WEN Ming-hao, CHEN Wei, LI Yan, ZHANG Zhe
(Huazhong University of Science and Technology, 430072 Wuhan, China)

Abstract In this paper, a digital simulation on teed line and its system is presented. The performances of relays on teed transmission line, which include the zero-sequence directional relay, the fault component impedance relay, the directional relay using positive-sequence fault component and the directional relay using composite positive-sequence and negative-sequence fault components, are computed and analyzed. It demonstrates that the protection on teed line has their own features and the well-behaved protection on normal line may be inappropriate on teed line. With the development of power system, especially the development of urban power network, the more teed lines will be come forth, the more research work on protection of teed line is very important to theory and practice.

Key words teed line; digital simulation; directional relaying

(上接第 8 页)

- [3] Sun D I, Bruce Ashley, Brain Brewer, Art Hughes, William F Tinney. Optimal Power Flow by Newton Approach. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems. 1984, PAS-103 (10): 2864-2880.
- [4] Sergio Granville. Optimal Reactive Dispatch Through Interior Point Methods. IEEE Trans on Power Systems. 1994, 9(1): 136-146.
- [5] Momoh J A, Guo S X, Ogbuobiri E C, Adapa R. The Quadratic Interior Point Method Solving Power System Optimization Problems. IEEE Trans on Power Systems. 1994, 9(3):

1327-1336.

- [6] 王宪荣. 潮流与最优潮流的研究. 哈尔滨工业大学博士论文, 1990. 1-40.
- [7] 王永刚, 韩学山, 王宪荣, 柳焯. 动态优化潮流. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 195-198.

收稿日期: 1999—03—30

作者简介: 王永刚 (1970 -), 男, 博士, 主要从事电力系统自动化研究; 柳焯 (1926 -), 男, 教授, 博导, 从事电力系统稳定的研究。

THE RESEARCH ON THE PRACTICAL STRATEGY OF THE OPTIMAL LOAD FLOW

WANG Yong-gang¹, LIU Zhuo²

(1. XI Electric Corporation, 461000 Xuchang, China; 2. Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract Based on the theoretical analysis and the practical procedure of the Optimal Power Flow, this paper presents the practical strategy of OPF. The software which has been used on a large system in China proves that the strategy is an effective tool on the optimal analysis of power system.

Key words Newton; OPF; practical