

改进的变尺度法在自动电压控制(AVC)中的应用

孙阳盛, 郁惟镛, 倪向萍

(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

摘要: 采用分层分区、集中和分散控制相结合的思想, 实现了电力系统无功电压的实时在线控制。控制中心层利用改进的变尺度法(DFP)在线计算满足约束条件的各节点的最优无功配置, 通过 SCADA/EMS 系统实时传送到节点层; 节点层根据最优的无功配置, 利用模糊控制理论确定有载调压变压器、电容器等电压无功调节设备的调节策略。本文重点论述了中心控制层中改进的 DFP 的基本算法、实时控制的优势, 并对实时控制过程中的相关问题提供了解决方案, 实现了实时控制的各种要求。通过对 IEEE6 节点、IEEE30 节点和安徽电网等的计算分析, 结果充分证明了本方法的可行性、优越性和鲁棒性。

关键词: 自动电压控制; 变尺度法; 无功优化; 实时控制

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)06-0027-04

0 引言

随着电力系统自动化水平的提高及厂网分开的进一步实施, 自动电压控制(AVC)的研究和实施已经提上了日程。作为现代电网控制的基本而重要的功能, AVC 是指在优化电压无功潮流的支持下, 保证电压质量、降低网损、提高稳定储备, 实现在线实时无功电压控制。但是, 一个实时的优化电压无功控制程序的成功实施与应用, 面临着许多特殊的要求与挑战:

- 1) 满足鲁棒性, 即调节策略对初始点不敏感, 只会随着约束条件而变化。这就需要采用合适的模型、提供足够的操作信息, 从而全面描述问题; 并且采用相应的策略, 保证程序不会陷入局部最优解。
- 2) 应扩大优化问题的范围, 即为了适应实时应用的环境, 需要考虑进一步的约束条件。
- 3) 正确处理离散模型, 保证控制结果最优。
- 4) 计算速度快, 在满足精度要求的条件下, 尽量减少计算量。

在本课题中, 通过采用分层分区、集中和分散控制相结合的思想, 实现了电力系统无功与电压的实时在线协调控制。控制中心层通过 SCADA/EMS 系统实时获取各厂站运行状态, 利用改进的变尺度法(DFP)在线计算满足电压约束条件的各节点的最优无功配置, 通过 SCADA/EMS 系统实时传送到节点层; 节点层根据控制中心层的最优无功配置和当前的状态, 利用模糊控制理论确定有载调压变压器、电容器等电压无功调节设备的调节策略。本文重点论述了控制中心层中改进的 DFP 法、实时控制的优势

以及实施过程中相关问题的解决方案。

1 数学描述

控制中心层中最重要的部分就是优化电压无功潮流, 本文中利用改进的 DFP 法求解无功优化的 LP 模型, 计算各节点的最优无功补偿值, 为节点层的调节策略提供依据。

1.1 目标函数

以系统有功损耗最小为目标函数:

$$\min P_L = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n [\sum_{jk} (P_j P_k + Q_j Q_k) + \sum_{jk} (Q_j P_k - P_j Q_k)] \quad (1)$$

满足约束条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_i = V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ U_{\min} < U_i < U_{\max} \\ Q_{G\min} < Q_G < Q_{G\max} \end{array} \right. \quad (2)$$

其中:

$$\theta_{ij} = \frac{R_{ij} \cos(\theta_j - \theta_i)}{U_i U_j} \quad (3)$$

$$\theta_{ij} = \frac{R_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i)}{U_i U_j} \quad (4)$$

$\theta_j - \theta_i$ 表示与节点 i 相邻的节点 j , 且包括 $j = i$ 。控制变量为各可控节点的无功 Q_i 。

在当前的系统运行点附近将目标函数(1)线性化, 这时控制变量的变化范围被限定在一个有限的范围内, 将系统的有功网损表示为各节点注入无功的函数。线性化的目标函数表示为:

$$\min P_L = P_{L0} + \left[\frac{\partial P_L}{\partial Q_1}, \frac{\partial P_L}{\partial Q_2}, \dots, \frac{\partial P_L}{\partial Q_n} \right] \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \dots \\ Q_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.2 改进的变尺度法 (DFP)

变尺度法的基本特点是从单位矩阵开始,每次迭代中用上次迭代得到的信息来构造本次迭代中的 H 矩阵(称为变尺度矩阵),然后按照式(6)求得本次迭代的搜索方向,由一维搜索法确定搜索步长。在收敛过程中,迭代的 H 矩阵序列逐次逼近海森矩阵的逆。算法流程图见图 1。

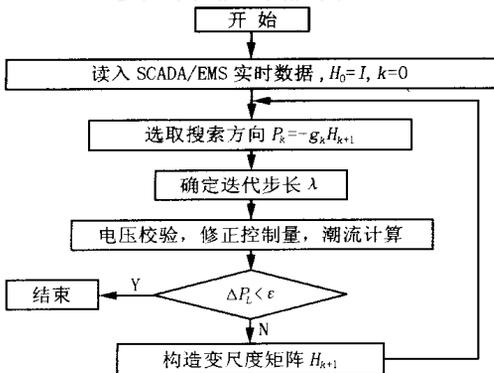


图 1 改进的变尺度法 (DFP) 流程图

Fig. 1 Flow chart of modified DFP

流程图中可见:

$$g_k = \left[\frac{\partial P_L}{\partial Q_{1,k}}, \frac{\partial P_L}{\partial Q_{2,k}}, \dots, \frac{\partial P_L}{\partial Q_{n,k}} \right] \quad (6)$$

$$H_{k+1} = H_k + \frac{Q_k (Q_k)^T}{(Q_k)^T g_k} - \frac{H_k g_k (g_k)^T H_k}{(g_k)^T H_k g_k} \quad (7)$$

1.3 算法改进

1) 循环控制

DFP 法的迭代起始点是系统的现有运行点,当迭代次数等于网络节点数 (n) 时,若还未达到收敛精度,则将前 n 步作为一个循环,以 Q_n 为初始点,重新设置 $H = I$,开始新一轮循环。从而避免累计误差破坏搜索方向的共轭性,保证全局收敛。为了满足实时控制在时间上的要求,在迭代中如果状态变量的修正很小,可以在下次迭代中维持 H 不变,即两次迭代用相同 H 矩阵。

2) 步长确定

最简单的步长计算方法是试探法,即初始步长取 1,走一步后如目标函数未下降,将步长减半,直到目标函数下降或达到收敛判据为止。但对于电力系统而言,相关变量都是通过求解潮流方程得到的,因此按初始步长在搜索方向上走一步之后,要解一次潮流才能得到新的目标函数,如果反复试探步长,

就需要反复求解潮流,这显然不合理。为避免反复计算潮流,用第 k 次潮流计算的各点 U 、 Q 值近似计算 ($k+1$) 次的网损。由式(5)可知,目标函数可以表示为控制变量 Q 的二次函数,通过推导,可以得到使目标函数 P_L 最小的步长为:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^n \left(P_i \times \frac{\partial P_L}{\partial Q_j} - P_j \times \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \right) - \sum_{j=1}^n \left(Q_j \times \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} + Q_i \times \frac{\partial P_L}{\partial Q_j} \right) \right]}{\sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^n \left(2 \times \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \times \frac{\partial P_L}{\partial Q_j} \times ij \right) \right]} \quad (8)$$

同时注意到本方法是在系统的现有运行点附近将系统目标函数线性化,而经线性化的目标函数只能近似表示系统运行点附近的情况。因此,步长必须限定在一定的范围之内。通过大量试验后发现,的最大值设定为 0.05 是最合理的选择。即: $-0.05 \leq \lambda \leq 0.05$ 。

2 中心控制层策略

2.1 电压约束与校正

考虑到电网安全性与经济性的协调,对电压约束的处理中,强调约束优先级,即电压优先原则。在满足电压考核指标的大前提下,在允许的范围内减少电压偏移同时减少有功网损。具体可以表示为二级优先:

- 1) 不计网损,消除电压越界;
- 2) 在现有的调节手段下,减少电压偏移量的同时减少有功网损。

表 1 电压 - 无功修正量表

Tab. 1 Voltage-reactive power modification	
U_i	$Q_{i,k+1}$
$U_i > 1.05$	$Q_{i,k} - t \times \left x \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \right $
$1.05 > U_i > 1.02$	$Q_{i,k} - \left x \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \right $
$1.02 > U_i > 0.97$	$Q_{i,k} + \left x \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \right $
$0.97 > U_i > 0.95$	$Q_{i,k} + \left x \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \right $
$U_i < 0.95$	$Q_{i,k} + t \times \left x \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} \right $

为保证电压满足电压约束、减小电压偏移值,并充分体现约束优先级的理念,本方法引入模糊理论,根据各节点电压值对其无功补偿进行相应的修正,即在一次迭代修正时插入电压校验环节,根据表 1 修正各控制变量后才开始进入新一轮迭代。

表 1 中, t 为电压越界的惩罚系数,其值可根据经验和试验后具体调整。经过试验,在本方法中 $t = 8$ 。

可以看出, $t \gg \tau$, 这充分体现了约束优先级的理念,即如果发生电压越界,则不计损失将其规范至约束范围内;如果电压发生偏移,则结合网损进行相应的补偿,减少偏移量。

2.2 无功约束与校正

本课题的核心思想在于分层分区、集中和分散控制相结合,其成功实施的关键在于:控制中心层根据改进的DFP变尺度法所确定的各节点最优无功配置,在节点层通过对发电机、电容器、有载调压变压器等无功电压调节设备的调节达到或近似达到。所以,节点可分为三种类型,见表2。

表2 节点类型

Tab.2 Node types

Flag	节点类型	示例
1	不可调	负荷、人工指定点等
2	连续可调	发电机、调相机等
3	离散可调	有载调压变压器、电容器等

对于不可调节的节点,在迭代过程中其控制变量 Q 维持恒定;对于连续可调节节点,在迭代过程中控制变量在 $[Q_{\min}, Q_{\max}]$ 之间调节;对于离散可调节节点,由于其电容器、变压器分接头等的离散性质,难以进行精确的计算,所以结合了模糊控制的理论,引入了模糊量 Q ,通过隶属函数确定无功优化值的可行性,具体实现方法将在节点层的控制策略中论述。

3 算例分析

对IEEE6节点、IEEE30节点以及安徽电网EMS实时数据分别进行了测试分析,篇幅所限,只列举部分结果。测试时,各节点的电压上下限均为 $[-0.95, 1.05]$,系统主要测试环境为:P4 1.7G、256M内存的普通PC机。

表3 有功网损的计算结果

Tab.3 Calculated results of power loss

测试系统	优化前	优化后	下降率/ %
IEEE6节点	0.001 0	0.000 912	8.8
IEEE30节点	0.053 5	0.051 6	3.55
安徽电网 500 kV	0.286 8	0.273	4.81
安徽电网 220 kV	0.494 9	0.482 4	2.53

1) 有功损耗

各测试系统典型运行方式下有功损耗见表3,系统基准容量均为100 MVA。

2) 电压质量

以IEEE6节点为例,列举了优化前、共轭梯度

法、改进DFP法的各节点的电压和有功网损的计算比较结果,见表4。

表4 IEEE6节点电压比较表

Tab.4 Node voltage comparison of IEEE6

节点号	优化前	共轭梯度法	改进DFP法
1	0.960 07	0.962 50	0.960 33
2	0.926 29	0.928 63	0.957 22
3	1.016 04	1.018 61	1.016 26
4	1.011 22	1.013 78	1.010 86
5	0.978 92	0.981 40	0.978 77
6	1.000 00	1.000 00	1.000 00
最大 U	1.016 04	1.018 61	1.016 26
最小 U	0.926 29	0.928 63	0.957 22
网损 P	0.001 0	0.000 955 8	0.000 912

从表4可以看出,电压质量明显提高,节点2电压从原来的不合格点纠正到了电压限范围之内,所有节点电压均满足约束的上下限,同时,系统网损下降了8.8%。

3) 收敛性

由于最后的计算结果是潮流计算结果,在中间的迭代过程中改变的只是各节点的注入无功 Q ,而潮流算法已经是很成熟的技术,因此本算法收敛性得到了保证。

控制中心层具有规模大、变量多、需要对矩阵进行多次迭代等特点,程序的执行时间主要取决于控制中心层的网络规模以及变尺度法的迭代次数,具体统计结果见表5。

表5 性能测试结果

Tab.5 Performance of test results

测试系统	迭代次数	计算时间/ s
IEEE6节点	11	0.08
IEEE30节点	16	0.94
安徽电网 500 kV	8	0.72
安徽电网 220 kV	19	1.06

对于有载调压变压器而言,其调节时间一般需要一分钟左右,因此,在实时控制时,无功电压控制程序的运行周期不能低于1 min,甚至更长,因此,本算法的计算时间是充裕的,完全能够满足实时控制的需要。

4 结论

本文论述了分层分区、集中和分散控制相结合的自动电压控制系统中控制中心层的实现策略,快速、准确地确定了最优无功配置,并针对实时控制过

程中遇到的问题给出了最优迭代步长的计算、电压约束与校正、无功约束与校正的方法。通过 IEEE6 节点、IEEE30 节点、安徽电网的测试计算,充分证明了本方法的可行性、优越性和鲁棒性。

参考文献:

- [1] 粟塔山,等(SU Ta-shan, et al). 最优化计算原理与算法程序设计(The Theory of Optimization & Program Design) [M]. 长沙:国防科技大学出版社(Changsha:National Defense Science and Technology University Press),2001.
- [2] 汤兵勇,等(TANG Bing-yong, et al). 模糊控制理论与应用技术(Fuzzy Control Theory & Technical Application) [M]. 北京:清华大学出版社(Beijing:Tsinghua University Press).
- [3] 唐寅生,等(TANG Yin-sheng, et al). 湖南 500 kV 电网自动电压控制方法研究(Study on Method of Automatic Voltage Control for 500 kV Power Network in Hunan) [J]. 中国电力(China Electric Power),2001,24(8):31-38.

- [4] 白树忠,等(BAI Shu-zhong, et al). 基于 SCADA 的配电站电压无功实时监控(Voltage and Reactive Power Control in a Distribution Substation Based on SCADA) [J]. 控制与决策(Control and Decision),2000,14(4):493-496.
- [5] 吴浩,韩祯祥(WU Hao, HAN Zhen-xiang). 电压稳定的实时监控(Real-time Monitoring and Control of Voltage Stability) [J]. 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment),2001,22(1):11-14.

收稿日期: 2003-06-30; 修回日期: 2003-08-12

作者简介:

孙阳盛(1978 -),男,硕士研究生,研究方向为人工智能在电力系统中的应用;

郁惟镛(1940 -),男,教授,博士生导师,长期从事人工智能在继电保护中的应用的研究;

倪向萍(1980 -),女,硕士研究生,研究方向为电力系统自动电压控制。

Application of modified DFP in the automatic voltage control(AVC)

SUN Yang-sheng, YU Wei-yong, NI Xiang-ping

(School of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Based on the thoughts of delaminating, centralizing and decentralizing control, the realtime online control of reactive voltage is realized in power system. In the central level, the modified DFP method is adopted to calculate the optimal control of reactive power for each controllable node whose voltage is kept within required constraints, the active power loss at its minimum, and the results are transferred to the node level via SCADA/EMS system. In the node level, dispatch strategies for LTC transformers, capacitors and other equipments for accommodation reactive power are determined under the guidance of the fuzzy theory. This paper focuses on the basic algorithm of modified DFP method used in the central level and the advantages of real-time control, and presents the scheme for the relevant problems of online control, which meets some requirements for real-time control. The method presented by this paper is proved feasible, superior and robust when tested in the system of IEEE 6 buses, IEEE 30 buses, and Anhui Province power grid, etc.

Key words: AVC; DFP method; reactive power optimization; real-time control

全国性电荒影响河南 今年比去年更缺电

河南电力公司 2004 年工作会议上通报,今年河南省电力供应形势仍十分严峻。根据预测,今年夏季省网最高负荷将达到 1 500 万 kW,最高负荷时电力缺口 200 万 kW,电力供需矛盾更加突出。

今年,河南省电力供需形势比 2003 年更为严峻,是“九五”以来最为紧张的一年,造成这个局面的原因如下: 全省新增电力装机容量集中在下半年投产,错过用电的高峰季节,不能满足电网度夏的需求,省调电厂电煤供应协调难度加大,也会直接影响到机组发电; 全国性电力紧缺,夏季,三峡电力全部支援华东,吸收外来电力难度增加。

针对严峻形势,河南省电力部门将在加强电网调度和需求的管理上,按照“先错峰、后避峰、再限电、最后拉路”的原则,全力以赴做好电力紧缺条件下的电力供应,确保重点单位、重要时期、重大活动和全省居民生活用电。