

AVC 应用于江苏电网的初步研究

许文超¹, 郭伟¹, 李海峰², 胡伟²

(1. 东南大学电气工程系, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省电力公司运行方式科, 江苏 南京 210024)

摘要: 基于电力系统电压自动控制理论, 结合江苏电网的现状, 借鉴其他省的研究成果, 从全局闭环优化控制的角度提出在江苏省实施分布式自动电压控制的策略。分布式自动电压控制策略实施的关键环节是对电网进行分区和中枢节点的选择, 提出了基于电气距离的向上分级合并迭代的算法, 并应用于江苏电网, 得到较行政分区更为合理的分区结果, 为控制策略的进一步实施提供了依据。

关键词: 自动电压控制; 分布式控制策略; 分区; 中枢节点; 向上分级合并迭代

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)05-0023-04

1 引言

随着电力工业的发展, 大容量电厂和电力用户的大电力系统的出现, 电压问题已经不只是一个供电质量的问题, 而且是关系到大系统安全运行和经济运行的重要问题^[1]。国内各大电网也相继认识到电压控制的重要性。江苏省电网的无功电压现状存在较多问题, 而无功电压的控制手段也基本停留在比较原始的各地就地平衡, 相邻区域之间缺乏协调, 因此从省网角度看电压未得到较好的控制。鉴于此, 省电力公司提出基于自动电压控制 (Automatic Voltage Control^[2]) 的江苏电网无功电压分级分布式优化控制的研究。在研究的初级阶段, 首先要进行省网的分区和中枢节点的选择。本文提出基于电气距离概念的向上分级合并迭代分区算法, 并使用该算法对江苏电网进行了分区, 为三级控制策略的实施提供依据。

2 AVC 的基本概念

基于最优潮流 (OPF) 的实时电压自动控制 (AVC) 集安全性和经济性于一体, 可实现安全约束下的经济性的闭环控制, 被公认为是电力系统调度控制发展的最高阶段^[3]。AVC 系指在正常运行情况下, 通过实时监视电网无功电压情况, 进行在线优化计算, 分层调节控制电网无功电源及变压器分接头, 调度自动化主站对接入同一电压等级电网的各节点的无功补偿可控设备实行实时最优闭环控制, 满足全网安全电压约束条件下的优化无功潮流运行, 达到电压优质和网损最小。省级电网研究的 AVC 是集中控制型的, 也即在电网调度自动化系统 SCADA、EMS 与现场调度装置之间通过闭环控制实现

AVC。

电力系统自动电压控制 (AVC) 主要强调以下两个方面:

(1) 无功补偿可控设备的自动化。包括发电机、有载调压器、电容/电抗器、SVC、STATCOM 及其他无功补偿设备的自动控制;

(2) 全网无功/电压的最优化。

不难看出, AVC 主要着重于从全局的角度实现无功/电压的自动优化控制, 属于最优潮流 (OPF) 的研究范畴, 对于提高电力系统安全、优质、经济运行以及提高电力系统的调度自动化管理水平具有重要意义。已经有一些专家学者对 AVC 进行了研究并取得了一定成果。

3 AVC 的研究现状

3.1 国外的研究现状

少数著名的电力公司, 如德国的 RWE、美国的 PG&E、法国的 EDF 和意大利的 ENEL 等正在或准备进行在线实施全局无功最优控制的研究工作^[1]。在实施过程中, 根据电力系统的实际情况, 所采用的实现方式也各不相同, 欧洲的电力系统一般将电力控制分为三个等级, 分级比较如表 1 所示。这个模式符合电压/无功优化的区域性和电力系统分级分区调度体制的要求, 已在外国电力系统得以实施, 如法国等。

3.2 国内的研究现状

湖南省提出了采用经济压差进行全局无功优化的思想^[4], 即以每条线路的电压降落纵分量最小为目标求解最优潮流, 计算出各发电厂和变电站注入系统的无功功率, 而各发电厂和变电站通过安装电力系统型电压无功调整装置自动调节无功出力 and 变

压器的分接头,使其实际输出无功功率为计算出的无功优化值。

表1 欧洲三级电压控制模式分级比较

控制目标	控制方法	响应时间	
一级电压控制	调整由负荷波动、网络切换和事故引起的快速电压变化	AVR 等一次电压控制	1 s 至几秒*
二级电压控制	协调区域内的各一级电压控制	改变主导节点的电压参考设定值	几分钟
三级电压控制	协调全网的二级电压控制	OPF	几十分钟

* 变压器有载分接开关自动切换也属于就地的一级电压控制设备,但其响应速度慢,通常为几十秒至几分钟,主要用于缓慢但幅度大的负荷变化时维持电压质量。

河南省以河南电力系统为对象,进行了全局无功最优控制的仿真研究^[3],针对发电机、并联电容器(电抗器)、变压器有载分接头等无功可控设备的特点及调节性能进行了分析,确定了将发电机作为唯一控制手段的仿真研究方法。实践上,在电厂端装设 AVQC 装置,根据发电厂高压母线电压或总无功功率目标值调节各发电机的无功出力。

江苏省泰州市供电局开发的电网无功电压优化集中控制系统^[5],是通过采集调度自动化 SCADA 系统的实时数据,包括各变电所的节点电压、有功功率、无功功率等,以地区电网网损最小为目标,以各节点电压合格为约束条件,进行综合优化处理后,形成变压器有载分接开关档位调节、无功补偿设备投切集中控制指令,运用调度自动化“四遥”功能,实现整个泰州市电网无功电压优化运行。

另外山东、福建等省也准备进行自动电压控制方面的研究^[6],但从总体来看,目前从全局的角度进行无功/电压的自动控制处于初步研究阶段,电压的调控仍主要依赖于管理上的手段和现场运行人员的责任心和自觉性,未能从技术上实现类似于 AGC 那样的闭环控制,电压质量也难尽人意。

4 江苏电网的电压无功现状

江苏电网从各地、县来看,无功基本能够各自就地平衡;从全局角度来看,无功电压主要存在如下问题:

(1) 苏北电网无功过剩。低谷电压偏高矛盾更加突出。徐塘电厂 2 台 30 万 kW 机组投运后,从无功平衡情况可以看出,即使苏北大部分地区低谷时机组功率至 0.98 左右仍无法平衡过剩的无功。节假日用电负荷较轻,无功过剩将更为严重。

(2) 苏南电网无功不足。苏锡地区负荷增长较快,装机容量不够,受电口子有限,高峰时段电压控制对电容器的依赖较大,如高峰时电容器投入容量不够,将过多地耗用发电机无功,造成动态无功备用不足,电压偏低。而且电容器分布分散,运行部门难以控制。一旦机组跳闸或系统发生故障将缺少动态无功支撑,威胁到电网的安全运行。

(3) 无功自动投切装置较少。电力电容器的管理在各地的重视程度也不尽相同,靠人工投切难以做到视电压情况及时投切。夏季高峰时段的平均受电功率均未能达到《无功电压技术导则》0.95 的要求。

5 江苏电网的分布式自动电压控制策略

针对上述江苏电网无功电压的现状,遵循“分层分区,就地平衡”的原则,以及实时闭环优化控制的需要提出了分布式无功电压自动控制策略,基本框架如图 1 所示:

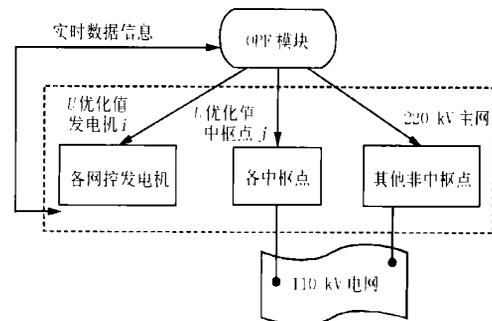


图1 江苏电网无功电压优化控制的基本框架

Fig. 1 Basic Frame of optimum voltage control in Jiangsu electric network

其中,对于电力系统中枢节点及非中枢节点电压的控制方式是不同的。中枢节点电压的控制方式可以采用如图 2 所示的方式。

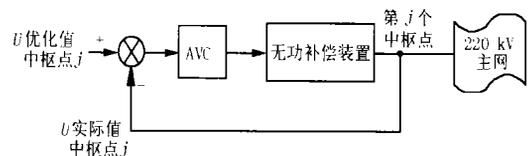


图2 中枢节点的电压控制方式

Fig. 2 Voltage control mode of pilot points

非中枢节点电压的控制一般采用以九区图为基础的电压监控方式。泰州供电局和河海大学联合开发的控制系统^[5]中,非中枢节点的电压控制是采用以地区无功电压优化为基础的电压监控方式,具有很

好的实时处理功能,值得借鉴,控制流程如图 3 所示。

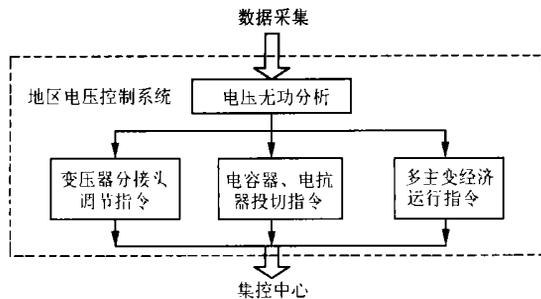


图 3 泰州市非中枢节点的电压控制方式

Fig. 3 Voltage control mode of nonpilot points in Taizhou city

6 分区并选择中枢节点

对电压进行分级分布式控制首先要解决的关键问题是对电力系统分区并确定各个区的电压中枢点。各个区的电压特性分别由各自的一些机组(称为控制发电机)的 AVR 来控制,AVR 的调节幅度由设定点的值和区内特殊点的电压值之间的差值来决定,这些特殊点就是中枢节点^[7],应该选择区内能够代表电压变化的节点,如果中枢节点和区内其他节点之间的电气距离很短,这个条件就能满足。不过另外两个条件也应该满足以保证好的控制:即区内必须有充足的无功电源;中枢点和邻近区域之间的电气距离必须足够大以确保不同区域之间尽可能小的影响。

6.1 电气距离映射函数

在潮流计算的迭代方程中:

$$[\dot{Q}] = [\partial Q / \partial U][U] \quad (1)$$

在式(1)中, $[\partial Q / \partial U]$ 为潮流计算 Jacobi 矩阵中的一部分,具体表达式为:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = \begin{cases} U_i (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) & i \neq j \\ \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) - 2U_i B_{ii} & i = j \end{cases} \quad (2)$$

而灵敏度矩阵 $[\partial U / \partial Q]$ 为矩阵 $[\partial Q / \partial U]$ 的逆,它是一个不对称矩阵。设系统中所有节点间的衰减矩阵为:

$$s_{ij} = [\partial U_i / \partial Q_j] / [\partial U_j / \partial Q_j] \quad (3)$$

这也是一个不对称矩阵, s_{ij} 的物理意义为:当某节点 j 的无功变化时,以对本身的电压影响作为参考值,对于网络中其他节点的电压影响能力。

又虑及电气距离矩阵应该具备对称性,故定义电气距离的映射函数^[8]为:

$$ed_{ij} = ed_{ji} = -\log_{10} |s_{ij} * s_{ji}| \quad (4)$$

6.2 向上分级合并的分区算法^[9]

给定一个 n 节点的系统,可以通过将一个独立节点(或者一个区)合并到另外一个区形成新的区的方法逐步减少区的数目,直到区的数目符合要求。

在进行区的合并时,为了保证进入节点距离的节点保持距离递增性,遵循“最大—最小电气距离”准则。即两个区之间的电气距离取两个区 S_A 、 S_B 之间所有节点间电气距离中的最大值,使得

$$ed_{S_A-S_B} = \max_{\substack{i \in S_A \\ j \in S_B}} (ed_{ij}) \quad (5)$$

而合并时,将所有区之间电气距离最小的两个区进行合并。具体步骤如下:

- 1) 将给定系统的 n 节点构成 n 个区;
- 2) 找出电气距离最近的两个区,将其合并为一个新的区域,区域数减1;
- 3) 使用式(5)重新计算此新区和其他区之间的电气距离;
- 4) 重复第2步骤,直到区域数为指定的数目 m 。

分区完成以后可以根据需要再进行电压中枢节点的选择。既然电气距离在一定程度上反映了系统中各节点电压之间的衰减变化关系,因此可以按下述方法选取中枢节点,即对子区域 e 中的所有节点,选取节点 k 为电压中枢节点,使得

$$\min_{k \in S_e} ed_{ik} \quad (6)$$

式中 S_e 为子区域 e 的节点集合。

6.3 迭代分区算法^[8]

给定一个 n 节点的系统,随机地指定 m (规定分区数)个节点作为初始中枢节点,将其余的 $(n-m)$ 个节点逐个比较各自和 m 个预选中枢节点的电气距离并选取最小的与之合并,然后对形成的 m 个区用式(6)重新选择 m 个中枢点,再将剩下的 $(n-m)$ 个节点通过比较电气距离进行合并,不断重复上述步骤直到两次得到的 m 个中枢点完全一致。具体步骤如下:

- 1) 给定初始的 m 个分区;
- 2) 按照(6)式计算出 m 个中枢节点;
- 3) 将剩余的 $n-m$ 个节点合并到与之电气距离最小的中枢点所在区;
- 4) 重复步骤2、3,直到连续两次的分区结果完全相同。

6.4 向上分级合并迭代算法

通过对 IEEE118 节点系统的仿真,发现向上分

级合并的分区算法可以得到接近最优解的结果,但速度比较慢;而迭代分区的算法速度较快,但却具有局部收敛性,能否得到最优分区和初始分区的选取有很大关系,很可能得到的只是局部最优解。但是如果迭代算法的初值取在最优解的附近,就一定可以找到全局最优解。鉴于此,本文提出向上分级合并迭代的算法进行分区和选择中枢点,即将上述两种算法相结合,首先用向上分级合并算法得出接近全局最优解的分区结果,将其作为迭代算法的初始状态再进行迭代求解,从而得到优化分区的全局最优解。以 IEEE118 节点系统为例进行仿真,表明不仅分区结果最优,而且速度较快。

6.5 江苏电网的分区及中枢节点的选择

将向上分级合并迭代的算法应用到 397 节点江苏电网中,分 7 个区,区域划分情况略。各区内的无功电源比较充足,各区计算所得的中枢节点分别为斗山 220 kV 母线、江都 220 kV 母线、徐州电厂、谏壁电厂、东善桥 220 kV 母线、三官殿 220 kV 母线、阳城电厂 500 kV 母线。根据实际经验这些点确实是能够代表附近区域电压水平的节点,故分区和枢纽节点的选择结果是比较合理的。

7 结语

随着省级电网的复杂化和电力用户对电能质量要求的提高,越来越迫切地需要从全局角度对电网进行无功优化调节控制。本文中三级控制思想运用到江苏电网中,提出对省网实施分级分布式的控制策略,这改变了原来仅仅各地县各变电站就地平衡,互相之间没有协调的现象,有利于实现整个省网的闭环实时控制,实现全网的无功优化配置。

本文在对江苏省网进行分区的过程中,提出的向上分级合并迭代算法结合了向上分级合并分区算法和迭代分区算法的优点,不仅能够得到最优分区结果,而且计算速度较快。实践证明对江苏省网的分区及枢纽节点的选择是较合理的。

Preliminary study on automatic voltage control of the electric network in Jiangsu province

XU Wen-chao¹, GUO Wei¹, LI Hai-feng², HU Wei²

(1. Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Operation Mode Department of Jiangsu Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: Considering present voltage/var condition of the electric network in Jiangsu province, this paper brings forward a strategy of putting distributed automatic voltage control into effect in Jiangsu power network based on the theory of global looplocked optimum control. The key is to partition the whole network into strongly connected sub-networks and choose reasonable pilot points. In this paper, an algorithm of ascending hierarchical and iterative classification based on the electrical distances is brought forward and applied to the Jiangsu network. A reasonable partition result is gained that provides foundation to the further implement of the strategy.

Key words: automatic voltage control; distributed control strategy; partition; pilot point; ascending hierarchical and iterative classification

参考文献:

- [1] 王梅义,吴竟昌,蒙定中.大电网系统技术[M].北京:中国电力出版社,1995.
- [2] Francisco Castro, Gabriel Llorca, Michele Pescina. Reliability Improvement of the Guri Hydroelectric Power Plant Computer Control System AGC and AVC[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(3): 447-452.
- [3] 孙宏斌,吴文传,张伯明,等.安全约束下的全局无功最优控制的仿真研究[J].电力系统自动化,1999, 23(5): 4-7.
- [4] 唐寅生,周全仁,周铁强.湖南 500 kV 电网自动电压控制方法研究[J].中国电力,2001, 34(8): 31-34.
- [5] 丁晓群,陈晟,许杏桃,等.全网无功电压优化集中控制系统在泰州电网的应用[J].电网技术,2000, 24(12): 41-44.
- [6] 唐寅生,李振华.安全约束下的 500 kV 山东电力系统最优无功功率调整控制方法研究[J].山东电力技术, 2000, 19(4): 6-8.
- [7] Ilic D, Spong M, Christensen J, Eichorn K L. Secondary voltage Control Using Pilot Point Information. IEEE Trans on Power Systems, Vol. 3, 1988, (2): 660-668.
- [8] Lagonotte P, et al. Structural Analysis of the Electrical System: Application to Secondary Voltage Control in France[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4, (2): 479-486.
- [9] 王耀瑜,张伯明,孙宏斌,等.一种基于专家知识的电力系统电压/无功分级分布式优化控制分区方法[J].中国电机工程学报,1998, 18(3): 221-224.

收稿日期: 2002-08-09; 修回日期: 2003-02-21

作者简介:

许文超(1979-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行与控制;

郭伟(1970-),男,博士,副教授,主要研究方向为电力系统运行与控制、电力系统微机保护;

李海峰(1973-),男,博士,工程师,主要研究方向为电力系统优化运行与控制、灵活交流输电系统。