

基于软分区的全局电压优化控制系统设计

孙宏斌¹, 张伯明¹, 郭庆来¹, 杨志新², 王小英², 李海峰²

(1. 清华大学电机系, 北京市 100084; 2. 江苏电力调度通信中心, 江苏省南京市 210024)

摘要: 中国的无功电压问题日益突出, 研发电力系统全局电压优化控制系统已经成为当务之急。文中借鉴了法国等欧洲国家的成功经验, 面向国内网、省调, 以现有的能量管理系统为基础, 设计实用的全局电压优化控制系统。提出了“软分区”的 3 级电压控制的新思路, 无须建设“硬”区域电压控制器, 而是在控制中心建设“软”二级控制和“软”三级控制, 以软件方式来实现控制的时空解耦, 较好地解决了多目标控制问题。探讨了控制系统在实现中的一些重要问题。这种新的控制模式非常适合发展中的中国电力系统, 即将在江苏省电网得到应用。

关键词: 电压控制; 优化; 分级控制; 信息理论; 电力系统

中图分类号: TM714.2

0 引言

频率和电压质量是电力系统运行的重要指标。经过多年努力, 我国各网、省调的自动发电控制 (AGC) 大多已达到了实用化, 电力系统的频率质量有了质的飞跃, 基本上满足了社会的需求。

随着社会生产和生活水平的提高, 我国的电压质量问题日益突出, 已成为当前电能质量的主要矛盾之一。具体体现在以下几个方面: 电压合格率较低, 无法满足现代社会生产和生活的高要求; 与频率控制不同, 电网中需要监控的电压点多, 调度员日常调压的工作量大, 同时由于无功电压的非线性强, 电压控制设备的特点不同, 调压难度较大; 无功流动较大, 引起网络损耗较大, 电网运行的经济性较差。

电力系统全局电压优化控制系统集安全性和经济性于一体, 实现闭环控制, 是电力调度自动化系统的高级形式, 它具有全局、实时、优化和闭环等几个方面的重要特征。迄今为止, 在国内, 尚未见在网、省局一级实现全局电压优化控制的报道。

本文立足国内, 面向网、省调, 以现有的能量管理系统 (EMS) 为基础, 设计实用的电力系统全局电压优化控制系统。考虑到当前该项研究中存在的问题和困难, 同时还考虑到电力系统调度控制技术和计算机技术的发展趋势, 在系统设计中, 将重点考虑和解决以下几个方面的问题: 多目标控制决策问题, 即电压的安全优质为第 1 位, 网损最小为第 2 位; 最

优潮流计算结果的可操作性; 无功控制有别于有功控制的特殊困难; 全局控制的逐步实施方案。

在本文的设计模式中, 借鉴了法国等欧洲国家的成功经验, 结合我国国情, 提出了“软分区”的新思路, 通过时空解耦, 系统地解决了多目标控制问题。同时探讨了控制系统在实现中的一些重要问题。

1 欧洲的 3 级电压优化控制模式

本文借鉴了现有的欧洲一些发达国家所普遍采用的 3 级组织模式^[1], 示意图见图 1。目前, 这种分级分区的电压控制策略已经在法国、意大利等多个国家付诸实施, 并运行多年, 取得了满意的效果。

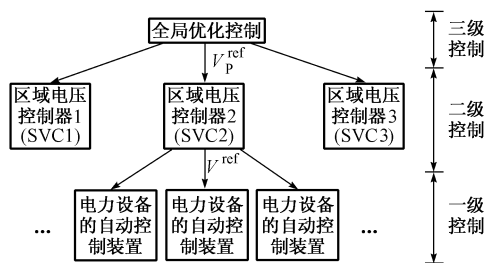


图 1 全局电压优化控制的 3 级组织模式
Fig. 1 Hierarchical structure for global optimal voltage control

这种分层组织机构由 3 级控制组成, 即一级电压控制 (primary voltage control), 二级电压控制 (secondary voltage control) 和三级电压控制 (tertiary voltage control)。

a. 一级电压控制由广泛分布在整个电力系统中的各种现有的自动控制装置组成, 为本地控制 (local control), 只用到本地的信息。控制器由本区域内控制发电机的自动电压调节器 (AVR)、有载调

压分接头(OLTC)及可投切的电容器组成,控制时间常数(记为 T_1)一般为几秒。在这级控制中,控制设备通过保持输出变量尽可能地接近设定值 V^{ref} 来补偿电压的快速和随机的变化。

b. 二级电压控制由多个分布在电力系统各区域控制中心的相互独立的区域电压控制器(SVC)组成,通过修改一级控制器的整定值 V^{ref} 来协调区域内一级控制器的行为。控制时间常数(记为 T_2)为几十秒到分钟级,控制的主要目的是保证中枢母线(pilot node)电压等于设定值 V_F^{ref} 。二级电压控制是一种区域控制(region control),只用到本区域内的信息。这种分区控制的理论基础是无功电压的区域特性。

c. 三级电压控制是其中的最高层,以控制中心EMS作为决策支持系统,以全系统的经济运行作为优化目标,并考虑安全性指标,最后给出中枢母线电压幅值的设定参考值 V_F^{ref} ,供二级电压控制使用。在三级电压控制中要充分考虑到协调的因素,利用了整个系统的全局信息来进行优化计算,一般说来,它的时间常数(记为 T_3)在十几分钟到小时级,一般采用最优潮流技术(OPF)。

在这种分级电压控制系统中,各级都有各自的控制目标,下级控制以上级控制的输出作为自己的控制目标。通过分级和分区,很自然地实现了电压的多目标控制。

2 全局电压优化控制模式设计

2.1 基于“软分区”的3级电压优化控制

我国电力系统的发展迅猛,运行工况也大幅变化,以硬件形式固定下来的区域控制器难以适应,同时,研制地理上分布的区域控制器投资也很大。因此,在国内各网、省调,欧洲这种3级组织模式在实现上是有困难的。

考虑到上述困难,同时也考虑到国内实际的电力调度管理体制和自动化的软硬件基础,提出了基于“软分区”的全局电压优化控制模式,详见图2。

图2中的一级控制与图1中的一级控制完全相同,而图2中的全局电压优化控制决策系统安装在控制中心中,以EMS作为决策支持系统,在软件组织上被分成2个级别,为区别于硬件上的3级组织机构,分别称之为“软”二级控制和“软”三级控制,分别承担了图1中的二级、三级控制系统的任务。

为便于理解,与有功频率控制做一个类比。在图2中,一级电压控制利用AVR等调节手段,与一次调频中发电机调速器等装置的自动动作类似;“软”二级电压控制对中枢点电压偏差的校正,与二

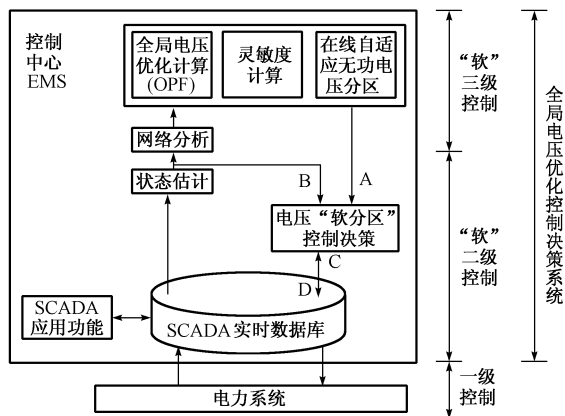


图2 基于“软分区”的全局电压优化控制模式
Fig. 2 Hierarchical control structure based on soft identification of secondary control zones

次调频中使用的AGC使区域控制误差不断减小为0类似;“软”三级电压控制对“软”二级电压控制的中枢点电压进行设定,与3次调频中通过经济调度软件(EDC)来设定AGC机组的运行点类似。

2.2 “软”二级电压控制策略(空间解耦策略)

在控制中心中,基于无功电压的局域特性,通过在线自适应的无功电压分区,整个电网被在线地分解成一个个围绕电压中枢母线的区域,分出来的区域应满足以下3个要求^[1,2]:

a. 中枢母线电压的典型性:在区域内,中枢母线一般是少量最重要的超高压母线,它们的电压行为足以代表整个区域的电压行为。

b. 区域可控性:在区域内,有足够的无功容量用于电压控制。

c. 区域间的解耦性:区域内的控制受区域外的控制操作的影响很小。

可采用文献[2]提出的分区算法,即:基于Shannon信息理论,获得电网电气距离的定义,再根据电气距离的远近来划分控制区域。由于这种分区是由软件在线自适应完成,分区不固定,因而本文称之为“软分区”,它能适应电力系统的不断发展和运行工况的实时变化。

与“软”二级控制密切相关的信息流已在图2中标识出:

a. 信息流A:在线自适应无功电压分区的结果、“软分区”控制决策所需的控制灵敏度、“软分区”控制的目标整定值 V_F^{ref} (一般是中枢母线电压的最优设定值,由OPF计算而得)。

b. 信息流B:经过实时状态估计的“熟”数据(包括:枢纽母线的电压、发电机的机端电压、发电机的无功出力、区域间联络线的无功潮流、状态估计的精度指标等)。

c. 信息流 C: 来自 SCADA 的“生”数据(包括: 枢纽母线的电压、发电机的机端电压、发电机的无功出力、区域间联络线的无功潮流等)。

d. 信息流 D: 一级控制器的整定值 V^{ref} 。

“软”二级控制利用在线自适应分区的结果, 采集经过实时状态估计的“熟”数据(若实时状态估计运行不正常, 可直接采集 SCADA 的“生”数据), 并通过 SCADA 系统, 对各个区域周期性地以轮循方式实行自动、闭环控制, 通过修改区域内一级控制器的整定值 V^{ref} 来维持该区域的枢纽母线电压水平和无功发电裕度。其控制决策的依据是在线计算出的电压控制灵敏度, 其控制目标为:

a. 将枢纽母线的电压 V_P 控制在设定值 V_P^{ref} 左右一个很窄的区限内, 即:

$$|V_P - V_P^{\text{ref}}| < \epsilon \quad (1)$$

b. 尽量保证同属一个区域的各受控发电机的无功裕度的均衡。

由于区域内枢纽母线个数一般远远少于发电机台数, 因此以上 2 个控制目标一般能在一个简单的、小规模二次规划问题下得到满意的协调。

针对这种“软”二级控制策略有以下几点讨论:

a. 保证区域的电压安全性和质量: 代表区域电压水平的枢纽母线的电压运行在 V_P^{ref} 左右, 从而保证了整个区域有好的电压质量; 而 V_P^{ref} 是由一个考虑各种运行约束的以网损最小为目标函数的实时无功优化潮流给出, 一般具有较高的电压水平, 离电压失稳的崩溃点的距离较远, 从而有效地加强了整个区域的电压安全性; 作为另一个重要的控制目标, 区域内发电机无功裕度的均衡保持了区域内各发电机组的 AVR 的调节能力, 提高了区域承受事故扰动的能力, 从而提高了安全性。

b. 分区域轮循的控制方式: 利用区域内的无功源来控制本区域的无功电压, 排除了区域外的无功源的参与, 因而控制是高效的, 而且受控设备数量少, 调整幅度小, 控制可行; 同时, 全局电压优化计算结果分区域逐个分时实现, 弥补了 OPF 在实时控制中可操作性不好的缺陷。

c. 控制质量高、精度高: 一方面是由于在线自适应分区能真正保证电压实时控制的区域解耦性; 另一方面是能够利用在线计算出的高精度的全局控制灵敏度来决策区域控制, 在某一个区域控制决策时隐含地考虑了其他区域对本区域控制的影响。这些均是“硬”分区策略所无法比拟的。

d. 可靠性: 倘若量测系统出现局部故障, 状态估计软件无法有效运行, 中止了“软”三级控制, “软”二级控制仍能按照既定的控制灵敏度和区域内

SCADA 量测信息, 对大多数的区域进行有效的电压控制。

e. 控制效果的可视化: 通过监视枢纽母线的电压即可监视整个电网的电压水平和质量, 大大降低了所需监视的电压数量; 另外, 由于区域内无功裕度的均衡和区域间无功电压的解耦性, 可以定量地表达各区域的无功裕度。

f. 对局部的电压安全问题具有更快的响应速度: 各区域的调节控制具有独立性, 控制有针对性, 计算规模小, 无须全局优化计算, 实时响应速度快, 这一点对于面向安全的实时控制是很重要的。

g. 便于协调离散型的和有调节次数约束的可控设备^[3,4]。

2.3 “软”三级控制策略

“软”三级控制基于状态估计和 OPF, 运行在 EMS 的最高层次上, 用以协调“软”二级分区控制的行为, 以实现安全约束下的网损最小, 其主要任务有 3 项: ①在线自适应的无功电压分区的确定; ②各区域枢纽母线电压的最优设定值 V_P^{ref} 的计算; ③电压控制灵敏度的计算。

以上任务的启动一般是自动的和周期性的, 也可由电力系统实时拓扑变化来启动。

其中, 第 1 项任务由一个基于电气距离的在线自适应的无功电压分区软件来完成^[5], 主要目标是: 在线确定分区个数、各区域可控无功设备的组成和受控的枢纽母线。第 2 项任务由考虑各种运行约束的最优潮流来完成^[6], 通过在线的超短期负荷预报, 预报出下一个控制周期内的系统负荷均值, 以该平均负荷作为最优潮流的基态潮流来做网损最小化的无功优化计算, 给出各区域枢纽母线电压的最优设定值 V_P^{ref} 。第 3 项任务由灵敏度分析软件包来实现^[7]。

在线计算出来的分区方式、 V_P^{ref} 和电压控制灵敏度均通过局域网发送至“软”二级控制工作站, 实现对“软”二级控制的协调和决策支持, 通过“软”二级控制和一级控制最终实现安全约束下的网损最小的经济性目标。

2.4 各级控制的响应周期的设计(时间解耦策略)

与图 1 所示的欧洲模式相同, 在“软分区”3 级控制系统中, 同样存在各级控制在时间上的配合问题。本文设定“软”三级控制的启动周期(记为 T_3')为 1 h; “软”二级控制的区域轮循启动周期(记为 T_2')为 3 min; 而以发电机 AVR 为主的一级控制器的响应周期(T_1)一般在 5 s 以内。这样的设计保证了 $T_3' \gg T_2' \gg T_1$, 从而使 3 个级别上的控制在时间上得以解耦, 各级控制作用不会相互干扰。

与图 1 所示的欧洲模式相同,本文所提出的“软分区”控制模式,同样很好地解决了多目标控制问题,即:一级控制和“软”二级控制以安全性和优质为主要控制目标;经济性由“软”三级控制来考虑,响应周期较长。从而体现了安全优质是第 1 位的,而经济性是第 2 位的控制目标。

3 实现中的几个重要问题

3.1 常见的电压控制设备及其角色

控制设备的多样性是无功电压控制有别于有功频率控制的主要困难之一,各类控制设备的控制能力和特点差异很大,例如:连续型/离散型的不同、设备调节次数约束等。

在实时控制中,仅仅利用数学手段来协调上述复杂的实际因素常常是行不通的^[8]。本文认为:可以通过对电压控制设备的调节性能的研究,规定其在控制系统中充当的角色,并进而协调其行为。在网、省调电网中,常见的电压控制设备的情况见表 1。

表 1 常见的电压控制设备
Table 1 Some familiar voltage control devices

设备类型	特点	控制能力
发电机/调相机	可连续调节,没有调节次数约束,能及时快速响应系统中无功电压的扰动	系统中主要的无功源,建立和维持电压水平,保证系统无功平衡,降低网损
并联电容器/并联电抗器	机械投切,有投切次数约束(1 d 几次),切换速度较慢	重要的无功补偿设备,维持电压水平,降低网损
有载调压分接头	机械调节,有调节次数约束(1 d 几次),调节速度较慢	改善无功电压分布,降低网损

针对表 1 给出的控制设备,本文制定如下的使用策略:

a. 发电机/调相机作为“软”三级控制中惟一的控制手段而参与无功优化计算,由于没有离散型控制变量和调节次数约束,目前的实时无功优化软件能够胜任。

b. 并联电容器/并联电抗器作为“软”二级控制主要的协调对象,目的在于通过它们的投切补偿来保证各区域内发电机/调相机在较长时间段内有足够的无功裕度,一方面保持了区域内有足够的快速响应事故和扰动的能力,提高了电压的安全性;另一方面,无功的就地平衡也有益于网损的下降,提高了经济性。容易实现的协调策略是“削峰填谷”,即:当区域负荷进入波峰时,优先考虑本区域内并联电容器的投入(或并联电抗器的退出),而当区域负荷进入波谷时,优先考虑本区域内并联电容器的退出(或

并联电抗器的投入)。由于日负荷曲线一般均为两峰一谷,因此,投切次数能满足约束要求。仿真研究结果详见文献[4]。

c. 有载调压分接头一般由本地一级的自动控制环节来实现自动的闭环控制。当需要在控制中心中实现集中式控制时,可以考虑利用预报的日负荷曲线和无功优化潮流程序来制定日调度计划,同时采用平滑化技术^[9]来满足调节次数的约束。在实施时,按照既定的日调度计划定时地对分接头进行自动的调节控制。

3.2 全局电压优化控制工程的实施原则

全局电压优化控制系统在工程实施时,由于可控设备数量大、分布范围广、层次多,再加上实际情况复杂,一般无法做到集中控制所有的可控设备,而是先集中控制一部分,并允许全局控制的范围由小到大逐步发展。一般可以选择某一个条件较好的区域先集中控制起来,被选中的区域应当与电网其他部分在无功电压上是解耦的,作为“软”二级电压控制的一个独立分区。在试点区域取得成效后,逐步推广到全网。这样,不可避免地,就出现了全局控制与未能加以集中协调的局部控制相互并存的情形。针对这种情况,提出了如下的解决方案:

a. 在“软”二级控制中,将局部控制对全局控制的准稳态物理响应以准稳态灵敏度^[7]的方式考虑进区域控制决策中去。

b. 在“软”三级控制中,在原有的 OPF 数学模型中增加局部控制的准稳态物理响应的约束,例如:当发电机装有自动电压调节器(AVR),则考虑增加等式约束 $\Delta V_G = 0$;当发电机装有自动无功调节器(AQR)或自动功率因数调节器(APFR),则考虑增加等式约束 $\Delta Q_G = 0$ 。

综上所述,尽管在原理上,全局控制与局部控制之间的配合一般不存在很大的困难,但要保证全局电压优化控制可分步实施时,必须提高原有决策支持软件的灵活性和适应性。

4 结论

从我国国情出发,面向网、省调,设计了实用的基于“软分区”的 3 级电压控制的新模式,该新模式即将在江苏省电网中得到应用。

a. 在“软分区”的全局电压优化控制策略下,无须建设“硬”区域电压控制器,而是在控制中心建设“软”二级控制和“软”三级控制。通过“软”二级控制的空间解耦,提高了控制系统的可操作性、可靠性和实现的可行性,而且“软分区”由软件在线自适应完成,在对电力系统发展变化的适应性上,明显优于欧

洲的“硬”分区模式;另一方面,通过各级控制的时间解耦,解决了多目标控制问题。

b. 确定了各种电压控制设备在控制系统中的角色,对不同类型控制设备进行协调控制。

c. 探讨了全局电压优化控制系统分步实施的原则,提出了全局控制与局部控制之间相互配合的解决方案。

参考文献

- 1 Paul J P, Leost J Y, Tesseront J M. Survey of the Secondary Voltage Control in France: Present Realization and Investigations. *IEEE Trans on Power Systems*, 1987, 2(2): 505~511
- 2 Lagonotte P, Sabonnadiere J C, Leost J Y, et al. Structural Analysis of the Electrical System: Application to Secondary Voltage Control in France. *IEEE Trans on Power Systems*, 1989, 4(2): 479~486
- 3 孙宏斌(Sun Hongbin). 电力系统全局无功优化控制的研究:[博士学位论文](A Study on Power System Global Reactive Voltage Optimal Control, Doctoral Dissertation). 北京:清华大学(Beijing: Tsinghua University), 1997
- 4 孙宏斌,吴文传,张伯明,等(Sun Hongbin, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al). 安全约束下的全局无功最优控制的仿真研究(Study on Simulation of Security Constrained Global Reactive Optimal Control). *电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems)*, 1999, 23(5): 4~7
- 5 王耀瑜,张伯明,孙宏斌,等(Wang Yaoyu, Zhang Boming, Sun Hongbin, et al). 一种基于专家知识的电力系统电压分级分布式优化控制分区算法(Expert Knowledge Based Subarea Division

Method for Hierarchical and Distributed Electric Power System Voltage/VAR Optimization and Control). *中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE)*, 1998, 18(3): 221~224

- 6 严正(Yan Zheng). 最优潮流新算法的研究——交叉逼近法的理论与实践:[博士学位论文](A Study on New Algorithms for OPF: Theory and Implementation of Across Approximation Approach, Doctoral Dissertation). 北京:清华大学(Beijing: Tsinghua University), 1991
- 7 孙宏斌,张伯明,相年德,等(Sun Hongbin, Zhang Boming, Xiang Niande, et al). 准稳态的灵敏度分析方法(New Sensitivity Analysis Method Under Quasi-steady-state for Power Systems). *中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE)*, 1999, 19(4): 9~13
- 8 Tinney W F, Bright J M, Denaree K D, et al. Some Deficiencies in Optimal Power Flow. In: *PICA*. Montreal Canada: 1987. 164~169
- 9 Piret J P, Antoine J P, Stubbe M, et al. The Study of a Centralized Voltage Control Method Applicable to the Belgian System. In: *CIGRE*, Report 39~201. Paris: 1992

孙宏斌(1969—),男,博士,副教授,IEEE会员,从事调度自动化、配电自动化和电力市场的研究、开发和教学工作,目前重点研究电力系统信息学及其工程应用。E-mail: shb@mail.eea.tsinghua.edu.cn

张伯明(1948—),男,教授,博士生导师,IEEE高级会员,主要从事电力系统运行、分析和控制的研究和教学工作。

郭庆来(1979—),男,博士研究生,研究方向为能量管理系统和无功电压优化控制。

DESIGN FOR GLOBAL OPTIMAL VOLTAGE CONTROL SYSTEM BASED ON SOFT IDENTIFICATION OF SECONDARY CONTROL ZONES

Sun Hongbin¹, Zhang Boming¹, Guo Qinglai¹, Yang Zhixin², Wang Xiaoying², Li Haifeng²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2. Jiangsu Electrical Power Dispatching Center, Nanjing 210024, China)

Abstract: The voltage quality of power grid becomes more and more serious in China. It's urgent to develop global optimal voltage control system for energy control centers. In this paper, adopting the successful experiences of several power companies in Europe (such as EDF, RWE and etc), the design is done for practical global optimal voltage control system, which is based on energy management system and more fit for implementation in China. In the paper, a new idea of three hierarchical control structure based on soft identification of secondary control zones is presented. In the new structure, no hard secondary controller is needed, and both the secondary and tertiary controllers are implemented by software in the same control center. With different time constants and control zone division, the voltage control is decoupled, and the multi-objectives about economy, quality and security are coordinated here. Some important problems about implementation are discussed. Such new control structure will be applied to the power system of Jiangsu Province in China.

This project is supported by National Key Basic Research Special Fund of China (No. G1998020322) and National Natural Science Foundation of China (No. 50107005).

Key words: voltage control; optimization; hierarchical control; information theory; power systems