

· 专论与综述 ·

基于双向互动的多控制中心无功电压协调控制

马苏龙

(江苏省电力公司,江苏南京 210024)

摘要:提出了一种基于双向互动的多控制中心之间的在线无功电压协调控制方法,并以江苏电网为例给出了实时双向互动的控制效果。所提出的创新方法也可以扩展到智能电网的相关应用中。

关键词:双向互动;多控制中心;协调电压控制;智能电网

中图分类号: TM761+.1 **文献标志码:** A

文章编号: 1009-0665(2012)05-0001-04

目前,无功电压的控制方式主要可分为两种。一种是区域控制中心(RCC)和地区控制中心(LCC)独立控制。前者主要负责发电机的自动电压控制,后者主要负责变压器分接头和电容、电抗器的调整,相互之间不存在交互。另一种是区域控制中心自上而下对地区控制中心单向协调控制。在上级电网的协调控制决策中,除了满足本级电网的控制目标外,还需要实时跟踪由上级电网给出的协调变量的设定值。但无论采用哪种方式,由于控制系统之间缺乏信息交互,无法充分利用电网的无功资源,势必会导致各级控制的冲突和不协调。

解决上述问题的关键是实现控制中心之间的双向互动,即控制中心的协调既包括从上至下,也应包括从下至上的过程。基于上述背景,文中提出了基于双向互动进行实时无功电压协调控制的基本框架和实时控制方法,并以在江苏电网的实际应用为例示例了无功电压的协调控制效果和所提出控制方法的有效性。

1 基于双向互动的协调控制框架

和传统的独立控制或单向协调控制不同,双向互动协调控制的基本思想是区域控制中心和地区控制中心的地位是对等的,根据双方共同的控制能力和控制需求确定系统的控制状态,实现系统范围内无功资源的整体协调。

为能充分利用系统的无功控制资源,并尽可能减少对已有控制系统的影响,在原区域控制中心和地区控制中心之间引入了协调层,由协调层负责控制中心之间的协调,如图1所示。

整个协调控制过程包括了控制中心之间控制任务的分解和协调,协调控制的全过程可分为以下步骤:

(1) 计算能力需求:首先,区域控制中心和地区控制中心分别根据实时数据和局部控制信息计

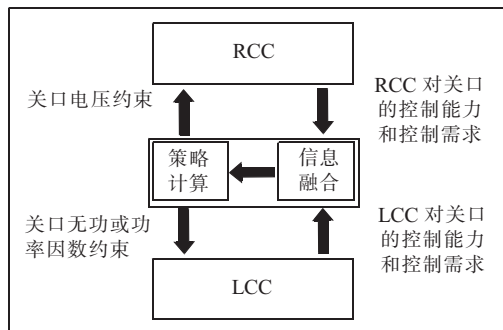


图1 双向互动的协调控制框架

算控制需求和控制能力,并发送给协调层;

(2) 协调信息融合:协调层的信息融合模块根据控制需求判断当前的协调状态,如果当前状态不协调,则转到(3);否则转到(5);

(3) 协调控制决策:协调层的控制决策模块分析不协调状态的原因,并且根据动作侧的控制能力和另一侧的控制需求综合产生相应的协调控制措施,随后将其转化为相应的协调约束传递给各个控制中心;

(4) 更新关口约束:各控制中心在接受到协调层的协调约束后,将协调约束追加到原有优化控制的约束中重新进行优化计算;

(5) 执行闭环控制:对控制设定值进行更新并下发到相应的执行站,由执行站实施对发电机或电容器等设备的调节,完成协调控制。

实时控制中保持控制系统的完整性是十分重要的。引入的协调层在该意义上可认为是“即插即用”的,这一点对于实际的控制系统尤为重要。基于此特性,区域控制中心和地区控制中心可以仅通过协调层获得各自需要的信息实现系统的协调控制而无需对原控制系统做实质性的改动。

2 实时协调控制方法

双向互动协调控制的目的是自动检测和平衡上下级控制中心的能力和 demand 并使其达到和谐的状态。

态。因此,实时协调必须满足以下要求:

在不协调状态下,如果一侧的无功控制能力不足或已耗尽,另一侧应该尽可能使系统恢复到正常状态;在正常状态下,协调的主要任务是尽可能保持系统最优或次优。

对协调层而言,在每个协调控制周期中,计算区域控制中心和地区控制中心各自的控制需求和控制能力,然后考虑追加的协调约束进行优化计算^[1]。

在第一个控制过程中,计算问题可描述为一个二次规划问题,求解控制需求和控制能力的过程等价于二次规划问题的求解过程。

2.1 区域控制中心的控制需求

对区域控制中心而言,可以关口无功出力最大向上(向下)可调度为优化目标,构造二次规划模型,求解出区域控制中心对关口无功的运行需求约束上限(下限)^[2]。区域控制中心侧计算控制需求时,将关口无功作为一定范围内可调节的优化变量与发电机一起纳入优化模型,如下所示:

$$\begin{aligned} & \max_{\Delta Q_g, \Delta Q_c} ||Q_c + \Delta Q_c||^2 \quad (1) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} V_g \leq V_g + C_{gg} \Delta Q_g + C_{gc} \Delta Q_c \leq \bar{V}_g \\ V_s \leq V_s + C_{sg} \Delta Q_g + C_{sc} \Delta Q_c \leq \bar{V}_s \\ V_c \leq V_c + C_{cg} \Delta Q_g + C_{cc} \Delta Q_c \leq \bar{V}_c \\ Q_g \leq Q_g + \Delta Q_g \leq \bar{Q}_g \\ Q_c \leq Q_c + \Delta Q_c \leq \bar{Q}_c \\ G \leq G(Q_g + \Delta Q_g) \leq \bar{G} \end{cases} \quad (2) \end{aligned}$$

式中: C 为发电机无功出力对母线节点电压的准稳态灵敏度; $Q_g, \Delta Q_g$ 分别为发电机无功出力及调节量; $Q_c, \Delta Q_c$ 分别为关口无功当前值及调节量; V_s 为需要监视的母线电压实际值; V_g 为发电厂高压母线电压实际值; G 为控制区域的无功裕度。

若将目标函数变为极小化形式,可以同理求得关口无功需求下限。

2.2 地区控制中心的控制需求

将关口母线电压和容抗器无功做为可调变量,基于准稳态灵敏度,计算出关口电压最高值。为此构造二次规划模型,如下所示:

$$\begin{aligned} & \max_{\Delta Q_c, \Delta V_L} ||V_L + \Delta V_L||^2 \quad (3) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} V_s \leq V_s + C_{cs} \Delta Q_c + C_{cv} \Delta V_L \leq \bar{V}_s \\ Q_L \leq Q_L + \Delta Q_L \leq \bar{Q}_L \\ f(Q_c + \Delta Q_c) \leq 0 \\ \Delta Q_L = C_{Q_Ls} \Delta Q_c \end{cases} \quad (4) \end{aligned}$$

式中: $V_L, \Delta V_L$ 分别为当前关口母线电压实测值及调节量; $V_s, \underline{V}_s, \bar{V}_s$ 分别为地区控制中心母线电压实测

值、下限值、上限值; $Q_L, \Delta Q_L, \underline{Q}_L, \bar{Q}_L$ 分别为关口无功的实测值、变化值、下限值、上限值; C_{cs} 为容抗器无功出力对地区控制中心母线电压的准稳态灵敏度; C_{cv} 为关口母线电压对地区控制中心母线电压的准稳态灵敏度; C_{Q_Ls} 为容抗器无功出力对关口无功的准稳态灵敏度; $Q_c, \Delta Q_c$ 分别为容抗器无功出力的当前值、变化值; $f(Q_c + \Delta Q_c) \leq 0$ 为容抗器设备等固定设备的自身约束。

将目标函数变为极小化形式,可以同理求得关口电压需求下限。

2.3 区域控制中心的控制能力

计算区域控制中心在满足约束条件下,尽可能增加所辖发电机无功出力,计算出关口电压的向上最大调节值。构造二次规划模型,如下所示:

$$\begin{aligned} & \max_{\Delta Q_g} ||V_c + \Delta Q_c||^2 \quad (5) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} V_g \leq V_g + C_{gg} \Delta Q_g \leq \bar{V}_g \\ V_s \leq V_s + C_{sg} \Delta Q_g \leq \bar{V}_s \\ V_c \leq V_c + C_{cg} \Delta Q_g \leq \bar{V}_c \\ Q_g \leq Q_g + \Delta Q_g \leq \bar{Q}_g \\ G \leq G(Q_g + \Delta Q_g) \leq \bar{G} \end{cases} \quad (6) \end{aligned}$$

式中: C 为发电机无功出力对母线节点电压的准稳态灵敏度; $Q_g, \Delta Q_g$ 分别为发电机无功出力及调节量; V_s, V_g 分别为需要监视的母线电压实际值和发电厂高压母线电压实际值; G 为控制区域的无功裕度。

将目标函数变为极小化形式,可以同理求得关口电压的向下最大调节值。

2.4 地区控制中心的控制能力

将地区控制中心的容抗器无功出力做为可调变量,基于准稳态灵敏度,计算出关口无功的最大值。为此构造二次规划模型,如下所示:

$$\begin{aligned} & \max_{\Delta Q_c} ||Q_L + \Delta Q_L||^2 \quad (7) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} V_s \leq V_s + C_{cs} \Delta Q_c \leq \bar{V}_s \\ Q_L \leq Q_L + \Delta Q_L \leq \bar{Q}_L \\ f(Q_c + \Delta Q_c) \leq 0 \\ \Delta Q_L = C_{Q_Ls} \Delta Q_c \end{cases} \quad (8) \end{aligned}$$

式中: $V_s, \underline{V}_s, \bar{V}_s$ 分别为地区控制中心母线电压实测值、下限值、上限值; $Q_L, \Delta Q_L, \underline{Q}_L, \bar{Q}_L$ 分别为关口无功的实测值、变化值、下限值、上限值; C_{cs} 为容抗器无功出力对地区控制中心母线电压的准稳态灵敏度; C_{Q_Ls} 为容抗器无功出力对关口无功的准稳态灵敏度; $Q_c, \Delta Q_c$ 分别为容抗器无功出力的当前值、变化值; $f(Q_c + \Delta Q_c) \leq 0$ 容抗器设备等固定设备的自身

约束。

将目标函数改为极小化模型,即可求解得到关口无功调节能力下限。

2.5 状态转移图(STD)

根据区域控制中心和地区控制中心的控制需求,全网状态可划分为 LCC 减 Q、RCC 降压、LCC 增 Q、RCC 增压,优化协调 5 种控制状态,关口运行状态图如图 2 所示。

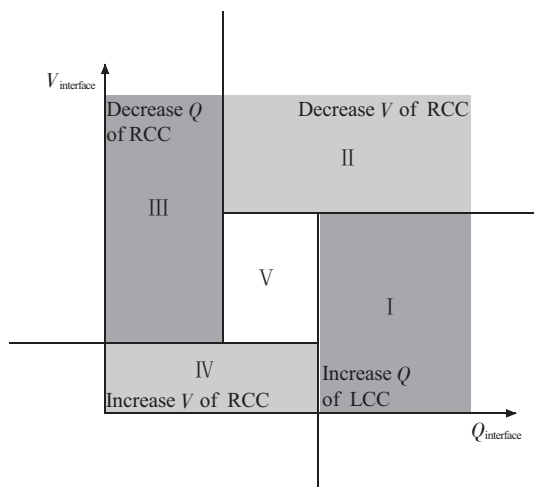


图 2 双向互动的协调控制状态转移图

根据两级控制系统的控制能力大小,可确定具体的控制转移路径,如表 1 所示。

表 1 不同状态下 RCC 和 LCC 的控制措施

状态	RCC 的控制措施	LCC 的控制措施
I	维持关口电压在正常范围内	增加无功或无法增加无功时保持无功出力不减
II	降低关口电压或无法降压时保持关口电压不变	维持关口无功在正常范围内
III	维持关口电压在正常范围内	减少无功或无法减少无功时保持无功出力不增
IV	增加关口电压或无法增压时保持关口电压不变	维持关口无功在正常范围内
V	(1) 关口电压正常时 松弛电压约束 (2) 关口电压偏高时 保持电压不升	(1) 关口无功正常时 松弛无功约束 (2) 关口无功偏小时 保持无功不增

STD 描述了 RCC 和 LCC 的当前控制状态和控制措施,和传统控制状态图的主要区别在于:

- (1) 各协调关口的状态图在每个控制周期自动更新;
- (2) 状态图的边界实时变化;
- (3) 关口无功和关口电压均来自上下两级控制中心。

3 实时控制效果

基于上述方法的智能协调电压控制系统已在

江苏电网获得成功应用。截至目前为止,约 71 台共 23.8 GW 的发电机和 79 台共 11 400 MV·A 的 220 kV 变压器投入闭环运行。

实际运行表明,该方法可有效缓解关口无功的不合理流动,降低了网损,减少了设备动作次数,提高了静态电压稳定裕度。

3.1 电压协调控制

当关口电压在正常范围内,而功率因数较低,地区从主网吸收无功过多。协调层检测到该运行工况时,关口运行状态位于 LCC 增 Q 区,协调层产生向地区电网内的无功电压控制系统发送增加无功的指令;LCC 收到增加无功的指令时,进行投电容器操作,关口下网无功减少,通过地调增加无功的调节,关口功率因数恢复到正常运行范围。

当关口母线电压过低,同时下级电网无调节能力时,LCC 向协调层上传升高电压的要求;协调层判定关口运行的状态位于 RCC 升压区时,产生 RCC 升压的协调策略;RCC 接受到升压的协调策略后,对相应电厂进行增加励磁的调节;当相应电厂发电机无功出力调整后,关口运行状态转移到优化协调区。

3.2 网损和静态电压稳定裕度

由于协调控制充分利用了地区电网的无功调节手段,改善了电网的无功本地平衡状态,提高了末端网络的电压支撑能力,从而提高了系统静态电压稳定裕度。

为测试协调控制对降低网损和增加系统静态电压稳定裕度的作用,在实际运行中挑选了 2 个负荷相似日进行了比较。在所选案例中,协调控制后,系统的网损率平均下降约 0.03 个百分点;静态电压稳定裕度平均增加了约 2.7%。

3.3 离散设备动作次数对比

实际效果如表 2 所示。

表 2 协调前后设备动作次数对比

设备类型	分接头	电容电抗器	所有设备
协调前动作次数	51	108	159
协调后动作次数	35 (↓45%)	82 (↓31%)	117 (↓35%)

通过对比可以看出,系统平均每天的动作次数由协调前的 159 次减少协调后的 117 次。这是由于上级电网的电压调节直接影响了地区辐射网络的 220 kV 母线根节点电压,从而有利于地区整体的电压调节,尤其是在负荷波动过程中,由于系统的协调控制帮助地区稳定了电压,避免了固定设备的频繁动作,从而减少了动作次数。

4 结束语

文中提出了基于双向互动的上下级控制中心之间的无功电压协调控制,用于解决不同控制中心控制目标冲突的问题或使整个控制过程更趋于优化。通过控制中心信息的相互交换和互相作用,所提出的方式使协调过程更加智能化;

(1) 各控制中心可容易地获知协调方的资源而无需变动目前的控制方式;(2) 一方控制能力耗尽时,由另一方尽可能提供支持;(3) 协调层退出或失效时,整个控制系统自动分为可独立运行的两部分,原控制中心回退到协调前的控制功能。

实际电网的运行控制证实了所提出控制系统控制性能的优越性及控制措施的有效性。

不难看出,该控制方式也适合于具有递阶控制结构的多控制中心之间实现类似的协调控制,为解决“智能电网”协调控制问题提供了重要借鉴。

参考文献:

- [1] IEEE Working Group on Voltage Stability, Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience [C]. IEEE Publication 90TH0358-2-PWR, 1990.
- [2] LI Haifeng, MA Sulong, LUO Jianyu, et al. A Novel Automatic Voltage Control on Large Power System [C]. CIGRE' 2009, China, 2009.

作者简介:

马苏龙(1964),男,江苏苏州人,高级工程师,主要从事电力系统运行和控制方面的研究和管理工作。

A Bi-directional Interaction Based Coordinated Reactive Power and Voltage Control for Multiple Control Centers

MA Su-long

(Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China)

Abstract: This paper presents a bi-directional interaction based approach for on-line coordination across multiple control centers in the area of reactive power and voltage control. Some results from Jiangsu electric power system demonstrate its real-time bi-directional interaction and show that it has a great performance. The proposed novel method also can be extended to similar applications of smart grid.

Key words: bi-directional interaction; multiple control centers; coordinated voltage control; smart grid

“十二·五”太阳能发电新目标——装机 2 100 万 kW

到 2015 年底,我国太阳能发电装机容量达到 2 100 万 kW 以上,年发电量达到 250 亿 kW·h。这是近日国家能源局发布的《太阳能发电发展“十二·五”规划》(以下简称《规划》)确定的指标。

具体发展指标是:实现较大规模发展。到 2015 年底,太阳能发电装机容量达到 2 100 万 kW 以上,年发电量达到 250 亿 kW·h。重点在中东部地区建设与建筑结合的分布式光伏发电系统,建成分布式光伏发电总装机容量 1 000 万 kW。在青海、新疆、甘肃、内蒙古等太阳能资源和未利用土地资源丰富地区,以增加当地电力供应为目的,建成并网光伏电站总装机容量 1 000 万 kW。以经济性与光伏发电基本相当为前提,建成光热发电总装机容量 100 万 kW。

产业竞争力明显提高。光伏电池基础研究与技术创新能力取得长足进步,建立比较完整的材料、生产装备、系统集成和辅助服务产业体系,光伏电池转化效率继续提高,产业链全面优化,光伏电池技术和成本的全球竞争力进一步提高。太阳能光热电站的整体设计与技术集成能力明显提高,形成若干家技术先进的关键设备制造企业,具备光热发电全产业链的设备及零部件供应能力。

政策体系和发展机制逐步完善。结合电力体制改革、电价机制改革,完善太阳能发电的政策体系和发展机制,建立有利于分布式可再生能源发电发展的市场竞争机制和电力运行管理机制,为太阳能发电产业发展提供良好的体制机制环境。通过新能源微网工程与新能源示范城市建设开展政策和发展模式创新,探索建立适合可再生能源发展的电力系统运行和管理模式。

另外,《规划》还提出,在“十二五”发展的基础上,继续推进太阳能发电产业化发展,到 2020 年太阳能发电总装机容量达到 5 000 万 kW,使我国太阳能发电产业达到国际先进水平。