

协调二级电压控制的研究

郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 吴文传, 李 钦

(清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京市 100084)

摘要:总结了协调二级电压控制(CSVC)的基本思想,提出了一种新的 CSVC 模型。在优先考虑中枢母线电压偏差最小的前提下,利用多余的控制自由度保证本区域发电机运行在无功裕度更大、出力更均衡的状态。仿真结果显示在分级电压控制体系中,如果二级控制环节采用所提出的 CSVC 模型将有利于提高系统的电压稳定裕度。基于该 CSVC 模型的二级电压控制模块已经在国内某省级电网得到实际应用。

关键词:分级电压控制;二级电压控制;协调控制

中图分类号: TM761.1

0 引言

20 世纪 70 年代,随着对电压崩溃本质认识的逐步深入,人们越来越意识到对电力系统无功流动进行合理协调和分配的重要性,在此基础上,产生了对电力系统进行分级电压控制的思想。可以说,从分级电压控制诞生的那一刻起,协调就成了其研究和应用的主体。法国电力公司(EDF)最早提出了以中枢母线、控制区域为基础的分级电压控制方案^[1],其中二级电压控制(SVC)在法国^[2]、意大利^[3]、比利时^[4]都得到了较好的应用。

随着电力系统的发展,系统之间的耦合日益紧密,原有的控制分区之间的弱耦合假设难以保证,传统 SVC 的效果受到了挑战。因此 EDF 以及一些学者在 20 世纪 80 年代中期开始了协调二级电压控制(CSVC)的研究^[5~8]。经过大量的仿真研究后,CSVC 于 1993 年开始在法国的西部电网投入应用,其所控制的区域包括 80 个母线、15 台发电机和 2 台调相机,实际的应用结果显示,CSVC 比原有 SVC 系统的控制效果更好^[6]。

CSVC 一般通过在控制中心求解多目标的二次规划模型实现,其基本出发点在于如何利用多余的控制自由度去实现对无功流动的调整。在前人对 CSVC 的研究中,文献^[8]的着眼点在于尽可能保证可控发电机之间的无功出力均衡,但是并没有考虑如何保留更多的无功裕度。而文献^[5~7]所提出的模型的协调效果依赖于如何给出无功出力设定值

Q_g^{ref} ,这需要额外增加计算或者手工指定环节,而且可控发电机的无功出力设定值 Q_g^{ref} 与中枢母线电压设定值 V_p^{ref} 可能产生的矛盾也是不容忽视的问题。本文提出了一种新的 CSVC 模型,其目的就是在中枢母线电压调整到位的前提下,保证本区域内可控发电机运行在无功裕度更大、出力更均衡的状态,仿真结果也验证了该 CSVC 模型的控制效果。

本文基于所提出的 CSVC 模型实现了完整的 SVC 模块,并作为某省级电网无功电压控制系统的一部分在实际中得到应用,现场控制效果良好^[9]。

1 基本思想

在 SVC 中,由于可控发电机数目大于中枢母线数目,因此除了保证中枢母线电压偏差最小之外,还可以有一定的控制自由度。利用这个自由度实现其他的协调目标,这就是 CSVC 的出发点。各种 CSVC 方案的技术路线都是类似的,不同之处在于如何协调多余的控制自由度。对一个区域的无功电压控制来说,需要协调的最关键变量就是可控发电机的无功出力。本文认为,如果本区域内的可控发电机无功裕度更大且出力更加均衡,将有利于系统稳定性能的提高,在物理概念上可以从以下几个方面理解这一问题:

1) SVC 是分区域进行的,同一区域内的节点耦合紧密,而不同区域间的节点耦合松散。从系统的角度去看,一个控制区域可以看做一个“广义节点”,而 SVC 正是在这个广义节点内部进行的。对于同一个控制区域内的可控发电机来说,它们与本区域内的负荷节点之间的电气关系相对比较接近,不会存在某些发电机距离负荷中心很近,而某些发电机

收稿日期: 2005-06-03。

国家自然科学基金资助项目(50595414, 50323002);国家重点基础研究发展计划专项资助项目(2004CB217904)。

距离负荷中心很远的情况,因此促使这些发电机的无功出力向均衡方向发展是合理的。

2)区域内发电机无功出力不均衡,意味着可能存在部分发电机的无功出力较多,比较接近上界。如果该区域出现故障,或者负荷的无功需求持续增长,可能导致这些出力较多的发电机无功达到上界,从而引发机端相应的控制器动作,将其无功值保持在限值以内,此时该发电机已经失去了维持机端电压不变的能力。从潮流方程的角度来看,相当于该节点从PV节点转换为PQ节点;而从控制的角度看,该节点由一个可控的节点变成了一个不可控的节点。对于电网来说,可控节点数目的减少,意味着电网应对扰动的能力降低,因此对系统稳定性不利。

3)本文所指的均衡有别于SVC所采用的根据无功容量进行简单的按比例分配。SVC中利用比例积分调节器根据中枢母线电压偏差得到区域的无功总需求,再将其按比例进行分配。从物理概念上看,这相当于把区域电网简化为一个单节点模型,因此无法考虑可控发电机与中枢母线之间不同的电气紧密程度。而本文所提出的CSVC模型首要考虑的是中枢母线的电压偏差最小,相对来说对发电机无功出力进行调整的优先级较低。在求解中枢母线的电压偏差最小时使用了灵敏度矩阵,从中已经体现了可控发电机与负荷节点之间的不同紧密关系。在实现此目标的情况下,再考虑促使发电机无功出力向着更均衡的方向发展。

4)在分级电压控制体系中,三级电压控制策略一般由最优潮流(OPF)给出。OPF是典型的非线性规划问题,其最优解很有可能在可行域的边界达到,这意味着此时有可能包含了将某些发电机的无功出力调节到限值的控制策略。尽管对于OPF本身来说,这没有违背其安全约束,但却造成了电网内无功裕度的降低,导致发电机之间的无功出力差异较大,不够均衡,对于电网的电压稳定水平有负面的影响。因此,在分级电压控制模式中,利用CSVC对三级给出的中枢母线设定值进行控制,同时对电网内的发电机无功出力进行合理的分配,实现经济性目标与安全性目标的协调,将有效地弥补直接使用OPF控制策略在保证电网安全性方面的不足。

2 数学模型

2.1 变量说明

本文提出的CSVC模型中所涉及各个变量的具体物理含义可从图1直观看出。其中 C_g, C_{vg} 满足下式:

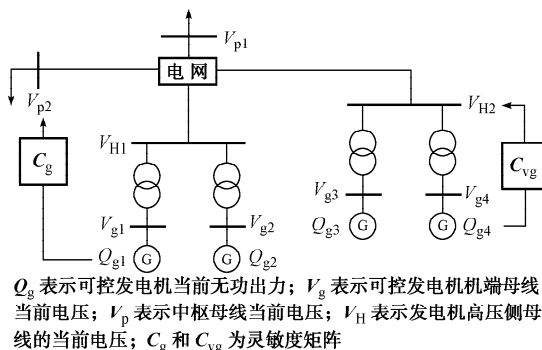


图1 CSVC模型中涉及的变量示意图

Fig.1 Sketch map of variables in CSVC

$$\Delta V_p = C_g \Delta Q_g \quad (1)$$

$$\Delta V_H = C_{vg} \Delta Q_g \quad (2)$$

在文献[5~8]的二次规划模型中,都使用可控发电机机端电压的调整量 ΔV_g 作为优化变量,而本文则选取可控发电机的无功出力调整量 ΔQ_g 作为优化变量,这主要出于以下原因:

1)从无功电压控制的过程来看,起到本质作用的是发电机的无功出力,因此直接选用它作为控制变量能更准确描述实际问题,和现场习惯保持一致。

2)由于在实际工程应用中经常出现多台参数接近的发电机挂接在同一母线上,它们对其他节点电压的灵敏度基本相同,这导致了灵敏度矩阵接近奇异,在求解二次规划问题时遇到困难。选择 ΔQ_g 作为控制变量,可以利用叠加原理将多台并列发电机的控制作用等效为其中某一台发电机的控制作用,从而保证得到可逆的灵敏度矩阵,物理概念上比较清晰,容易理解。

3)选用发电机的无功出力作为优化变量,可以更方便地在目标函数中对其进行必要的协调。

发电机高压侧母线电压 V_H 在控制系统中起着主站与子站交互变量的重要作用。主站系统计算得到控制策略后,下发给子站系统的命令不是如何调整发电机机端电压或者无功出力,而是给出电厂高压侧母线电压 V_H 的设定值;而子站系统再根据该设定值去求解发电机无功的调整量,利用自动电压调节器(AVR)实现一级的闭环控制。这样做主要是为了使主站和子站之间界面分割清晰,保证即使和主站之间的通道出现问题,子站仍能够根据预置高压母线的电压曲线,独立完成电厂级的本地控制,从而提高控制的可靠性。

2.2 目标函数

类似于文献[5~8],本文也采用了二次规划模型来完成协调SVC。为了实现增大发电机无功裕度并使出力更加均衡的目的,采用了不同的协调目

标。定义无功裕度向量 θ_g , 其第 i 个分量为:

$$\theta_{gi} = \frac{Q_{gi} + \Delta Q_{gi} - Q_{gi}^{\min}}{Q_{gi}^{\max} - Q_{gi}^{\min}} \quad (3)$$

二次规划形式的目标函数如下:

$$\min_{\Delta Q_g} \{ W_p \| a(V_p - V_p^{\text{ref}}) + C_g \Delta Q_g \|^2 + W_q \| \theta_g \|^2 \} \quad (4)$$

式中: ΔQ_g 为优化变量, 表示可控发电机无功出力的调节量; Q_g , $Q_g^{\min}$ 和 $Q_g^{\max}$ 分别为可控发电机无功当前值、下限和上限; V_p 和 V_p^{ref} 分别为中枢母线当前电压和设定电压; W_p 和 W_q 为权重系数; a 为增益系数。

目标函数(式(4))的第 1 项表示使控制后中枢母线电压与设定值之间的偏差尽可能小; 第 2 项表示控制后发电机的无功出力比例, 对于某台发电机, 该比例越小, 说明该发电机的无功裕度越大, 而以平方和的形式出现在目标函数中, 将促使各台发电机向无功出力更均衡的方向发展。

2.3 约束条件

完整的 CSVC 模型要求在满足安全约束条件下来求解式(4)的极小化问题, 这些约束包括:

$$|C_{vg} \Delta Q_g| \leq \Delta V_H^{\max} \quad (5)$$

$$V_H^{\min} \leq V_H + C_{vg} \Delta Q_g \leq V_H^{\max} \quad (6)$$

$$V_p^{\min} \leq V_p + C_g \Delta Q_g \leq V_p^{\max} \quad (7)$$

$$Q_g^{\min} \leq Q_g + \Delta Q_g \leq Q_g^{\max} \quad (8)$$

式中: V_p , $V_p^{\min}$ 和 $V_p^{\max}$ 分别为中枢母线电压当前值、下限和上限; V_H , $V_H^{\min}$, $V_H^{\max}$ 和 $\Delta V_H^{\max}$ 分别为发电机高压侧母线电压的当前值、下限、上限和允许的单步最大调整量。

为了防止控制操作对电网造成过大的波动, 在每一步控制中都对控制步长有严格的限制, 这通过约束式(5)加以实现, 其物理含义是控制后 V_H 的调整量要小于允许的的单步最大调整量 $\Delta V_H^{\max}$ 。约束式(6)和式(7)保证了控制后不会导致 V_p 和 V_H 越限, 对于其他一些比较重要的母线电压约束也可以类似地添加到约束条件中。约束式(8)保证了控制后发电机的无功出力不会越限。

利用起作用集算法(active set method)求解这个二次规划问题^[10], 得到 ΔQ_g 后再利用灵敏度矩阵换算成电厂高压侧母线电压设定值的调整量 ΔV_H , 作为控制策略下发。

3 仿真算例

3.1 IEEE 39 节点系统算例

首先采用 IEEE 39 节点系统来对第 2 节提出的

CSVC 模型的性能进行仿真研究, 其 SVC 分区方案如图 2 所示^[11]。

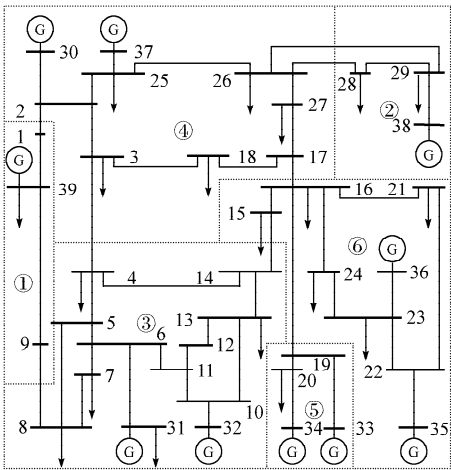


图 2 IEEE 39 节点 6 分区示意图
Fig. 2 Sketch map of IEEE 39 bus system decomposition with 6 areas

在每个分区中选定相应的中枢母线, 每个分区的相应信息如表 1 所示, 其中可控制发电机用所在母线编号表示。为了在仿真中研究无功裕度的变化, 定义各台发电机的无功上下限如表 2 所示。

表 1 IEEE 39 节点系统 SVC 分区信息
Table 1 Pilot buses and control generators of the secondary voltage control for IEEE 39 bus system

控制区域	中枢母线	可控发电机
1	1	39
2	28	38
3	6	31, 32
4	3	30, 37
5	19	33, 34
6	23	35, 36

表 2 IEEE 39 节点系统无功上下限
Table 2 High and low limits of control generators for IEEE 39 bus system

发电机节点	基态无功	Mvar	
		无功下限	无功上限
30	144.921 6	0	180
31	207.040 1	0	250
32	205.735 7	0	300
33	108.931 1	0	300
34	166.982 9	0	250
35	211.112 6	0	300
36	100.438 3	0	250
37	0.646 9	0	300
38	22.658 5	0	400
39	87.885 0	0	500

以区域 5 和区域 6 为例来说明 CSVC 的作用, 重点研究 SVC(不考虑对发电机无功出力的协调)

和第2节提出的CSVC(考虑发电机无功出力裕度和均衡)的性能对比。为使仿真结果更具代表性,对于区域5,给出的控制目标是提高中枢母线电压(对应可控发电机无功出力增加),而对于区域6,给出的控制目标则是降低中枢母线电压(对应可控发电机无功出力减少)。

图3和图4给出了采用传统的SVC前后和采用CSVC前后,区域5和区域6的可控发电机的无功出力情况。

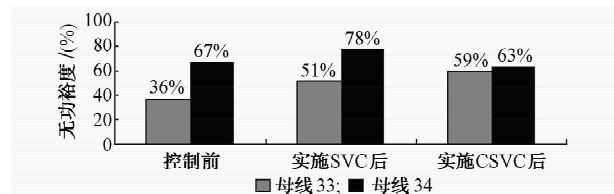


图3 区域5控制前后发电机无功裕度对比
Fig. 3 Reactive power comparison of control generators in control area 5 before and after control

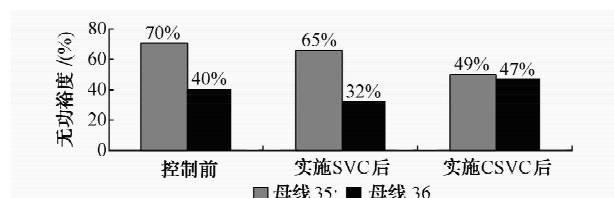


图4 区域6控制前后发电机无功裕度对比
Fig. 4 Reactive power comparison of control generators in control area 6 before and after control

从图表的对比中可以清楚看出,采用CSVC得到的发电机无功出力更加均衡。在SVC下,区域内可控发电机的无功出力总是处于同增或同减的趋势中,因此原有的无功出力不平衡通常难以得到改善,有时反而更加恶化;而在CSVC中,在保证中枢母线电压控制性能的前提下,利用多余的控制自由度驱使发电机的无功出力向裕度更大、出力更均衡的方向发展。

3.2 实际电网算例

利用某省级电网实际数据断面进行了仿真,重点研究采用CSVC对电网电压稳定性能的影响。

3.2.1 单断面静态仿真

采用的数据断面是该省级电网2004年10月29日09:59:20的实际历史断面,在同样的初始运行状态下,研究如下2种情况下的对比:

1)进行一次以网损最小为目标的OPF计算,并按照OPF结果直接进行控制,简称为OPF控制。

2)进行一次以网损最小为目标的OPF计算,按照该结果刷新中枢母线的最优设定值,然后按照第2节提出的CSVC模型进行控制,简称为OPF+

CSVC控制。

图5给出了控制前、OPF控制后以及OPF+CSVC控制后无功出力在不同范围内的发电机数目的分布情况。

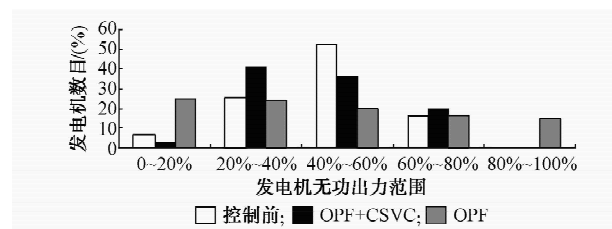


图5 无功出力在不同范围内的发电机数目分布
Fig. 5 Generator counts distribution in different reactive power range

为了分析不同控制方式对于发电机无功出力均衡程度的影响,本文将所有发电机的无功出力百分比作为一个样本,用方差来衡量其散度。对于OPF控制,方差为0.096,远大于采用OPF+CSVC控制情况下的方差值0.023,这说明投入CSVC后使得整个系统的无功出力更加均衡。从图5可以知道,如果直接采用OPF的控制策略,有25%的发电机无功出力接近下限运行(无功出力在0~20%的范围内),其中包括11.3%的发电机已达下界,同时有15%的发电机无功出力接近上限运行(无功出力在80%~100%范围内),其中包括10%的发电机已达上界,完全没有裕度。而如果采用了OPF+CSVC控制后,只有2.5%的发电机接近下限运行,且无发电机达下界,无发电机接近上限运行。

从无功裕度的角度看,在实施控制前,发电机无功出力数目最集中的区域是40%~60%,有52.5%的发电机无功出力处于这一范围,而经过了CSVC后,有41.3%的发电机无功出力位于20%~40%的范围内,成为数目最集中的区域。

发电机无功出力的不均衡所带来的问题更多体现在当系统出现扰动时,将导致某些发电机过早达到限值,丧失无功裕度,从而出现不合理的无功流动,系统无功损耗上升,进一步影响电网的稳定水平。为了研究这一问题,本文采用连续潮流法作为分析手段,利用PV曲线所给出的稳定裕度作为指标,研究2种情况下电网的电压稳定水平。本文设定的仿真方案是在基态负荷基础上,假定电网内某区域负荷持续增长,全网发电机参与提供功率,在SVC与CSVC这2种控制情况下的PV曲线对比如图6所示。

单纯采用OPF控制的结果可能导致发电机的无功裕度过小,而且不同发电机之间无功出力不均

衡(如图5所示),而采用 OPF+CSVC 控制后,可以增加发电机的无功裕度,并保证发电机出力处于一个更均衡的状态,此时系统的稳定裕度比 OPF 控制后增加了约 500 MW。

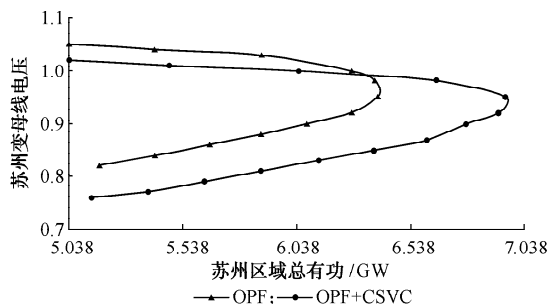


图6 2种控制模式下系统PV曲线对比
Fig.6 PV curve comparison between the two control modes

3.2.2 多断面动态仿真

上述的讨论都是针对一个单独的数据断面进行控制后的情况,但是电压控制本身是一个动态过程,随着系统负荷的波动,电网也处在不断的变化过程中,某个时刻的控制操作将直接影响电网在下一个时刻的初始条件。因此,衡量一个控制系统的效果不应该局限在某个系统运行点,应该从一个较长的时间段上衡量电网性能的综合改善情况。本文在进行仿真研究时模拟了电网负荷在 24 h 之内的变化曲线,重点研究在稳态条件下不同的电压控制模式的动态效果。利用该省级电网的历史数据库中从 2004 年 8 月 25 日 10:00 至次日 10:00 的系统负荷曲线,全天共仿真 288 点(每 5 min 一个采样点),其 24 h 的变化趋势如图 7 所示。

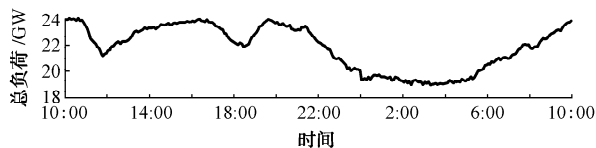


图7 系统负荷全天变化曲线
Fig.7 System load curve in a whole day

在 OPF 控制模式下,在每一点(每 5 min)都进行一次以网损最小为目标的 OPF 计算,并按照最优策略进行控制;在 OPF+CSVC 控制模式下,每 12 个点(1 h)进行一次 OPF 计算,得到中枢母线的电压设定值,每一点(每 5 min)按照 OPF(即三级电压控制)给出的设定值进行一次 CSVC。2 种控制情况下,全天的网损曲线对比如图 8 所示。

为了研究电压控制对于电网电压稳定水平的影响,在每个采样点假设某区域负荷持续增长,全网发

电机参与提供功率,利用连续潮流法计算控制后电网的稳定裕度,得到电网全天的稳定裕度曲线如图 9 所示。

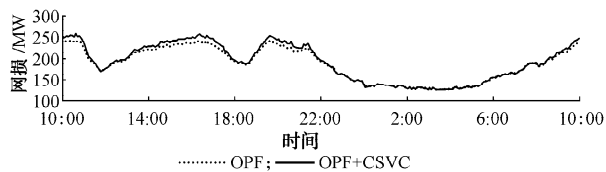


图8 全网网损曲线对比

Fig.8 Transmission loss curve comparison between the two control modes

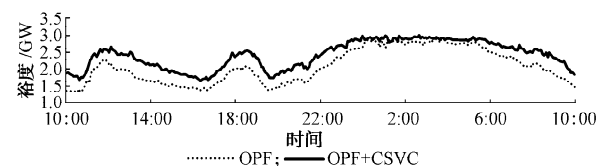


图9 全天稳定裕度曲线对比

Fig.9 System stability margin curve comparison between the two control modes

从对网损控制的情况看,OPF 控制优于 OPF+CSVC 控制,这是因为 CSVC 在最优潮流策略的基础上又进行了调整,得到的状态并非网损最小的状态。而这种调整得到的效果从全天稳定裕度曲线的对比(图 9)上可以清楚体现,在 OPF+CSVC 控制下电网的稳定裕度曲线高于单纯采用 OPF 控制的情况,可见经过 CSVC 的调整,电网沿着一个更合理的轨迹运行,这个轨迹虽然偏离了网损最小意义下的最优轨迹,但此时的电网更加安全,更易被现场工程师所接受。在分层电压控制模式中,由于 CSVC 的控制时间周期小于三级电压控制(OPF),这也体现了在电网运行中“安全第一,经济第二”的原则。

4 结语

重新审视本文的 CSVC 模型,不难发现其控制目标其实由 2 部分组成:第 1 部分的目的是使控制后的中枢母线电压趋近于设定电压,而这个设定电压不是凭空产生的,是三级电压控制根据自己的优化策略得到的,因此 CSVC 的这部分模型从本质上体现了三级电压控制的“经济性”目标;第 2 部分和发电机的无功出力调整相关,CSVC 利用多余的控制自由度来实现发电机无功出力在更大裕度下的均衡分布,由于这对于系统电压稳定裕度的增加具有重要的意义,这部分目标可以看做是“安全性”目标。因此,CSVC 的过程就是将经济性目标和安全性目标进行协调的过程。

参考文献

- [1] BLANCHON G. A New Aspect of Studies of Reactive Energy and Voltage of the Networks. In: Proceedings of 1972 Power Systems Computation Conference (PSCC). Grenoble (France): 1972.
- [2] PAUL J P, LEOST J Y, TESSERON J M. Survey of the Secondary Voltage Control in France: Present Realization and Investigations. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(2): 505—512.
- [3] ARCIDIACONO V, CORSI S, NATALE A et al. New Developments in the Applications of ENEL Transmission System Automatic Voltage and Reactive Control. In: Proceedings of CIGRE. Paris (France): 1990.
- [4] PIRET J P, ANTOINE J P, STUBBE M et al. The Study of a Centralized Voltage Control Method Applicable to the Belgian System. In: Proceedings of CIGRE. Paris (France): 1992. 39—201.
- [5] VU H, PRUVOT P, LAUNAY C et al. An Improved Voltage Control on Large-scale Power System. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1295—1303.
- [6] LEFEBVRE H, FRAGNIER D, BOUSSION J Y et al. Secondary Coordinated Voltage Control System: Feedback of EDF. In: Proceedings of IEEE PES 2000 Summer Meeting. Seattle (WA, US): 2000. 290—295.
- [7] SANCHA J L, FERNANDEZ J L, CORTES A. Secondary Voltage Control: Analysis, Solutions and Simulation Results for the Spanish Transmission System. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 630—638.
- [8] CONEJO A, AGUILAR M J. Secondary Voltage Control: Nonlinear Selection of Pilot Buses, Design of an Optimal Control Law, and Simulation Results. IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(1): 77—81.
- [9] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 江苏电网 AVC 主站系统的研究和实现. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 83—87.
GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming et al. Research and Development of AVC System for Power Networks of Jiangsu Province. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 83—87.
- [10] 袁亚湘, 孙文瑜. 最优化理论与方法. 北京: 科学出版社, 1997.
YUAN Ya-xiang, SUN Wen-yu. Optimal Theory and Method. Beijing: Science Press, 1997.
- [11] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区研究. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 36—40.
GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming et al. Power Network Partitioning Based on Clustering Analysis in Mvar Control Space. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 36—40.

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. E-mail: guoqinglai00@mails.tsinghua.edu.cn

孙宏斌(1969—), 男, 博士, 副教授, IEEE 会员, 从事调度自动化和配电自动化的研究、教学和开发工作, 目前重点研究无功电压优化控制和电力系统信息理论. E-mail: shb@tsinghua.edu.cn

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

Study on Coordinated Secondary Voltage Control

GUO Qing-lai, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, WU Wen-chuan, LI Qin

(State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The basic idea of CSVC (coordinated secondary voltage control) is surveyed firstly and a novel CSVC model is presented. The first goal of this model is binding the voltages of the pilot nodes to the reference values, and the second goal with lower priority is the optimal management of the reactive power among the control generators, which means an operation status with larger VAR reserves and uniform distribution. Simulation results confirm the improvement of voltage stability margin with the CSVC model proposed. Based on this CSVC model, a secondary voltage control system is developed and implemented in a provincial electric power control center in China.

This work is jointly supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50595414, 50323002) and Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217904).

Key words: hierarchical voltage control; secondary voltage control; coordinated control