文章编号:1000-8152(2007)06-0902-07

静态混成自动电压控制的研究

胡 伟,张雪敏,梅生伟,卢 强

(清华大学 电机工程与应用电子技术系 电力系统国家重点实验室,北京 100084)

摘要:将混成控制系统理念引入电力系统的静态电压控制,提出了静态混成自动电压控制系统.首先,建立了分 层分级的静态电压控制系统模型并设计了系统运行流程.其次,定义了安全性事件和经济性事件的发生机制,利用 离散事件驱动高层控制,形成的控制目标再下发至各对应的控制模块,从而实现复合指标控制.该系统降低了优化 问题求解难度,提高了运算效率,具有较高的可实现性.而且,该控制系统充分适应电力系统连续一离散相耦合的 特点,协调各种电压控制设备.计算机仿真研究表明,该控制系统可以提高电网的电压安全性和电压质量,合理分 配无功,同时减少网络损耗.

关键词: 混成控制系统; 混成自动电压控制; 离散事件; 复合指标; 计算机仿真 中图分类号: TM711 文献标识码: A

Static hybrid automatic voltage control systems

HU Wei, ZHANG Xue-min, MEI Sheng-wei, LU Qiang

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

Abstract: The concept of Hybrid Power Control System is introduced to the power systems' voltage control, and the static hybrid automatic voltage control(HAVC) system is established in the paper. Firstly, a new hybrid hierarchical voltage control system model based on the hybrid theory is proposed, and the operating process is designed. Secondly, the stability event and the economic event are defined to drive the system, through which one can achieve the synthetic objects of safety, stability and economy. Moreover, the system provides a much easier access to achieve optimal automatic voltage control, which is highly feasible in practice. The system's controlled targets, which are driven and decoupled by discrete events, are dispatched to different modules of sub-layer, so that the calculations become more efficient with higher realizability. Finally, computer simulation results are given to show the validity of the system and the designed approaches.

Key words: hybrid control system; hybrid automatic voltage control(HAVC); discrete events; synthetic objects; computer simulation

1 引言(Introduction)

自20世纪六七十年代以来,随着电力系统本身规 模的不断发展和复杂程度的不断增大,面向全系统 安全经济综合优化目标的电压自动控制理论与技术 成为现代电网的重大研究课题^[1,2].

根据系统中无功分区分层就地平衡的观点,电 压控制一般采用分层分级的控制模式.这种控制方 式可以在大区域范围甚至是全网范围内调节电压和 分配无功,它被认为是可能预防和阻止电压崩溃,实 现系统内无功合理分布的有效手段,因此受到各国 电力界的广泛关注.目前,"二级电压控制"^[3~6]和 "三级电压控制"^[7~10]技术已经分别在日本、法国 和意大利等国得到广泛应用.分级电压控制以系统 范围内的经济运行为控制目标,突破了初级电压控 制的不足.但是,已有的电压控制优化目标单一,不 能对电压安全性、电压质量以及网络损耗进行有效 的综合控制;同时缺乏有效的控制策略来处理电力 系统离散和连续相结合的特性,控制对象也大多仅 局限于发电机组的励磁控制器;缺乏有效的算法对 多种电压调节设备进行协调优化控制.

基于混成控制系统理论^[11~13],本文提出了静态 混成自动电压控制(hybrid automatic voltage control, 简称HAVC)系统.该系统打破了传统的基于时间的 控制模式,而代之以基于事件的控制模式,即以离 散事件为驱动主体,以消除事件为目标,同时考虑电 压安全性、电压质量以及网络损耗3项优化指标,而 不必求解一个大的多目标优化的问题.同时,该系统 采用了分级分层的系统结构,将离散事件与连续系

收稿日期: 2006-06-13; 收修改稿日期: 2006-12-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50607011, 50595411, 50525721);国家重点基础研究发展规划项目(G2004CB217902).

统分层建模,便于充分利用系统中的各种电压控制 设备.计算模拟仿真结果表明,本文所提出的静态 HAVC可以有效地提高电力系统的电压安全性和电 压质量,同时减少网络损耗,具有较强的实用背景.

2 静态HAVC系统(Static HAVC system)

电网安全性与经济性是电力系统运行的两大主题,也是电压控制的主要目标.以往电力系统的调度

控制一般只能根据调度人员的经验对系统状态作出 估计,然后选择一个控制目标(经济性或者安全性)对 系统的运行状态进行单目标控制,,难以真正实现多 目标的综合优化.

为解决以上难题,笔者构造了离散事件以驱动 系统的运行,并建立了分层的静态电压混成控制系 统(如图1所示).



图 1 静态混成自动电压控制系统模型 Fig. 1 Model of static HAVC system

由于电力系统规模大, 元器件和线路多, 信息 量巨大, 且覆盖地理范围广, 受到通讯条件的限制, 笔者不可能知道每个时刻每个电力设备的确切状 态. 因此首先在电力系统中选取一些关键节点, 通 过这些关键节点的信息来判断整个电力系统所处 的运行状态. 在静态HAVC系统中, 选取既能代表 在各种负荷扰动下的电力系统电压水平, 又对系 统电压安全裕度有较强灵敏度的节点作为关键节 点^[14].

然后,在已经确定了系统关键节点的情况下, 根据电力系统的实际运行状态做出判断,通过如 图1所示的电压调控选择离散判断环节^[14]去形成 离散事件,从而驱动相应的控制策略.静态电压最 高控制层在事件的驱动下,对电力系统当前的电 压安全性和运行的经济性分别进行分析判断,一 旦有指标越限,将形成离散事件去驱动相应的调 控环节,生成最高层的控制指令并下达到电压中 间控制层.最高层还可以接受调度员的调度指令 并发送至中间层,同时将最高层控制指令输出显 示给调度员.中间控制层将接收最高层下达的控 制指令,在掌握电力系统运行状态和控制设备投 运情况下,选择合适的控制对象和控制策略,形成 优化控制指令,并通过指令输出环节下达给底层 的各个发电厂、变电站等.底层控制设备接受指令 后控制器动作,改变电力系统的运行状态,达到混 成控制系统的设定值,从而保证系统的安全经济 运行.

在静态电压混成控制中,系统变化相对缓慢, 且控制指令下达时间间隔较长(一般为几十秒到 至几十分钟),可以不考虑电力系统中元件的动态 及调节器的调节过程,同时负荷可采用恒功率负 荷模型.此时系统模型可以用代数方程来描述.

3 静态混成电压控制最高层(High layer of static HAVC)

在静态混成电压控制最高层中,同时引入了安 全性分析和经济性分析的这两个离散判断环节, 它们可以各自形成离散事件去驱动相对应的控制, 并把优化后的控制结果通过接口环节下达给中间 控制层.同时最高控制层可以通过人机接口环节 接受调度员的操作指令,将自身的控制指令输出 显示.

3.1 安全性事件与调控(Safety event and control)

研究表明,电力系统潮流计算使用的Jacobian 矩阵的最小模特征值幅值与电力系统安全稳定域 大小相关,可以作为系统静态电压稳定裕度的指 标^[1,2].将实际系统最小模特征值的幅值(当前稳 定裕度)与设定的最小裕度相比较,可以判断系统 是否满足电压安全性.

3.1.1 安全性事件条件(Safety event's condition)

假设在第*k*个控制时间间隔后,系统设定的最 小模特征值的幅值为λ^{ref}_{min}(*k*),而根据测量和计算 后得到系统最小模特征值的实际幅值为λ_{min}(*k*). 系统将根据二者之间的差别大小,自动判断是否 应该形成电压安全事件并驱动控制.

电压安全性事件的逻辑条件如下:

$$E_{\text{safe}}(k) = \begin{cases} P_{\text{scon}}, \text{ if } \lambda_{\min}(k) - \lambda_{\min}^{\text{ref}}(k) < \Delta \lambda_{\text{safe}}, \\ P_{\text{snon}}, \text{ if } \lambda_{\min}(k) - \lambda_{\min}^{\text{ref}}(k) \ge \Delta \lambda_{\text{safe}}. \end{cases}$$
(1)

其中: $E_{\text{safe}}(k) \in \{P_{\text{scon}}, P_{\text{snon}}\}$ 为电压安全判断环 节的输出事件, $P_{\text{scon}} \alpha P_{\text{snon}} \beta \beta$ 代表当前需要和 不需要进行电压安全控制, $\Delta \lambda_{\text{safe}}$ 为设定的系统 允许最大差异值.

3.1.2 安全性调控环节(Safety control block)

电压安全控制环节受到安全判断环节发出的 离散事件驱动,如果事件为P_{snon},则保持上次控制 的输出值;如果事件为P_{scon},则形成控制指令并通 过接口环节发送至中间控制层.在该控制环节中, 设定需要增加的最小模特征值的幅值Δλ(k)为

$$\Delta\lambda(k) = \Delta\lambda_{\text{safe}}.$$
 (2)

由于在选取关键节点的时候,可以得到最

小模特征值 λ_{\min} 相对各关键节点的电压灵敏度 $\frac{\partial \lambda_{\min}(k)}{\partial V_{Pi}}$ ^[14],假设系统中有 α_P 个选定的关键节 点,通过求解下面的优化问题可以得到各关键节 点的电压控制量 $\Delta V_{Pi}(k)$ 的大小.

$$\begin{cases} \min Z = \\ k(|\Delta\lambda(k) - \sum_{i=1}^{\alpha_P} (\frac{\partial\lambda_{\min}(k)}{\partial V_{Pi}}) \Delta V_{Pi}(k)|) + \\ \sum_{i=1}^{\alpha_P} |\Delta V_{Pi}(k)| \\ \text{s.t. } V_{\min} \leqslant V_{Pi}^{\text{ref}}(k) \leqslant V_{\max}, \ i = 1, \cdots, \alpha_P. \end{cases}$$
(3)

其中: k为设定的权重系数, 而且

$$\Delta V_{Pi}(k) = V_{Pi}^{\text{ref}}(k) - V_{Pi}(k), \ i = 1, \cdots, \alpha_P.$$
(4)

其中: V_{Pi}^{ref}(k)为第i个关键节点在第k 个控制时间 间隔后的希望设定值, V_{Pi}(k)为第i个关键节点的 实测值. 各关键节点的控制量ΔV_{Pi}(k) 将作为控 制指令发送至中间控制层, 然后由中间控制层形 成对底层控制设备的控制指令.

3.2 经济性事件与调控(Economical event and control)

3.2.1 经济性事件条件(Economical event's condition)

在电力系统的电压控制中另一个重要的目标 是优化无功潮流以减小网络损耗,也就是所谓经 济性指标.由于电力系统的负荷具有随机性,因此 系统的状态时刻都在变化中.如果希望系统始终 保持最优化潮流,就必须对系统进行多次的调节, 这会增加调度中心工作量,而且控制设备也会因 频繁操作而降低使用寿命.因此在电力系统的静 态电压控制中,只有当电力系统的网络损耗超过 一定的范围时,混成电压控制系统的最高层才形 成离散事件,去驱动系统采取控制,以减小系统网 络损耗.

经济性事件的逻辑条件如下:

$$E_{\rm eco}(k) = \begin{cases} P_{\rm econ}, \text{ if } S_{\rm loss}(k) > S_{\rm eco}, \\ P_{\rm enon}, \text{ if } S_{\rm loss}(k) \leqslant S_{\rm eco}. \end{cases}$$
(5)

其中: $E_{eco}(k) \in \{P_{econ}, P_{enon}\}$ 为电压经济性判断 环节的输出事件, $P_{econ} \pi P_{enon}$ 分别代表当前需要 和不需要进行电压经济控制, S_{eco} 为设定的系统所 能接受的最大网络损耗值, $S_{loss}(k)$ 为第k个控制时 间间隔后的实际网络损耗值.

3.2.2 经济性调控环节(Economical control block) 电压经济控制环节受到电压经济判断环节发

电压经济控制环卫受到电压经济判断环卫友出的离散事件驱动,如果接受到的事件为Penon,则

904

保持上次控制的输出值不变;如果接受到的事件为*P*econ,则进行系统经济性分析,形成控制指令发送至中间控制层.该环节设定如下的优化问题^[15]:

$$\begin{cases} \min_{u} f(x(k), u(k)) \\ \text{s.t. } f(x(k), u(k)) = 0, \\ h(x(k), u(k)) \leq 0. \end{cases}$$
(6)

其中: x(k)和u(k)分别代表状态变量和控制变量, f(x(k), u(k)) = 0为系统潮流方程约束, $h(x(k), u(k)) \leqslant 0$ 为系统运行时的不等式约束, J(x(k), u(k))为为描述系统运行经济性的目标函数, 即系统总的线路损耗最小.

根据式(6),可以求出底层控制节点的优化值, 例如发电机节点电压参考值U^{ref}_{Gi}(k),无功补偿 器节点电压参考值U^{ref}_{Si}(k),有载调压器变比参考 值t^{ref}_i(k)等.上述参考值都将作为控制指令发送至 中间控制层,再由中间控制层形成底层控制器的 控制指令,最后底层控制元件动作,改变电力系统 的运行状态,使得网络损耗减小,从而保证系统运 行的经济性.

4 静态混成电压控制中间层(Middle layer of static HAVC)

静态电压控制中间层接受最高控制层发出的 指令(包括各关键节点的控制参考量,以及各控制 节点的电压参考值)之后,经过优化运算处理,得到 各控制节点的实际控制量,然后下达给底层控制 器实现.这样既能实现对电压安全性的控制,又能 满足系统的经济性.

4.1 发电机和无功补偿器节点的电压控制(Control of generator and component buses)

发电机组和无功补偿装置均可以通过改变无 功功率的输出,使得安装元件的节点电压在一定 范围内变化.由于是静态电压控制,不考虑控制装 置的动态过程,同时假设发动机组和无功补偿装 置电压变化时负荷节点的无功不变,因此可以列 写如下的快速分解法^[14,15]Q-V迭代方程:

$$-\begin{bmatrix}B_{DD} & B_{DP} & B_{DG} & B_{DS}\\B_{PD} & B_{PP} & B_{PG} & B_{PS}\\B_{GD} & B_{GP} & B_{GG} & B_{GS}\\B_{SD} & B_{SP} & B_{SG} & B_{SS}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta V_D(k)\\\Delta V_P(k)\\\Delta V_G(k)\\\Delta V_S(k)\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0\\0\\\Delta Q_G(k)\\\Delta Q_S(k)\end{bmatrix}.$$
(7)

上式中: B是电力系统中节点导纳矩阵的系数,下标P代表关键节点,下标D代表除关键节点外的负荷节点,下标G代表发电机节点,下标S代表无功

补偿器节点, k代表第k个控制时间间隔后. 进一步 假设系统中有 α_G 个发电机节点, α_S 个无功补偿器 节点, 令

$$\Delta V_{Gi}(k) = V_{Gi}^{\text{set}}(k) - V_{Gi}(k), \ i = 1, \cdots, \alpha_G, \ (8)$$

$$\Delta V_{Si}(k) = V_{Si}^{\text{set}}(k) - V_{Si}(k), \ i = 1, \cdots, \alpha_S.$$
(9)

其中: V_{Gi}^{set}(k)和V_{Si}^{set}(k) 分别代表控制后的发电机 节点和无功补偿器节点电压值, V_{Gi}(k)和V_{Si}(k)分 别代表控制前的数值.

将式(7)中的下标为D的负荷节点消去有

$$-\begin{bmatrix} \tilde{B}_{PP} \ \tilde{B}_{PG} \ \tilde{B}_{PS} \\ \tilde{B}_{GP} \ \tilde{B}_{GG} \ \tilde{B}_{GS} \\ \tilde{B}_{SP} \ \tilde{B}_{SG} \ \tilde{B}_{SS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_P(k) \\ \Delta V_G(k) \\ \Delta V_S(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta Q_G(k) \\ \Delta Q_S(k) \end{bmatrix}.$$
(10)

上式中上标"~"代表化简后的矩阵,于是得到

$$\Delta V_P(k) =$$

 $-\tilde{B}_{PP}^{-1}\tilde{B}_{PG}\Delta V_G(k) - \tilde{B}_{PP}^{-1}\tilde{B}_{PS}\Delta V_S(k) =$
 $T_{PG}\Delta V_G(k) + T_{PS}\Delta V_S(k).$ (11)

电压中间控制层的目标是使得关键节点的电 压控制量等于ΔV_{Pi}(k)的同时,各发电机节点和无 功补偿器节点的电压值尽量接近优化潮流计算后 的电压参考值,即满足以下的优化问题:

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2} (\Delta \tilde{V}_{G}^{\mathrm{T}}(k)) R_{1}(k) (\Delta \tilde{V}_{G}(k)) + \\ \frac{1}{2} (\Delta \tilde{V}_{S}^{\mathrm{T}}(k)) R_{2}(k) (\Delta \tilde{V}_{S}(k)) \\ \text{s.t. } \Delta V_{P}(k) - T_{PG} \Delta V_{G}(k) - T_{PS} \Delta V_{S}(k) = 0. \end{cases}$$
(12)

上式中
$$R_1(k)$$
和 $R_2(k)$ 为对角权矩阵,而且
 $\Delta \tilde{V}_{Gi}(k) = V_{Gi}^{\text{ref}}(k) - V_{Gi}^{\text{set}}(k), \ i = 1, \cdots, \alpha_G,$
(13)

$$\Delta V_{Si}(k) = V_{Si}^{\text{ref}}(k) - V_{Si}^{\text{set}}(k), \ i = 1, \cdots, \alpha_S.$$
(14)

在上面两式中,上标set代表控制量,上标ref代表优 化潮流给出的参考控制量.

建立拉格朗日函数

$$L_{1} = \frac{1}{2} (\Delta \tilde{V}_{G}^{\mathrm{T}}(k)) R_{1}(k) (\Delta \tilde{V}_{G}(k)) + \frac{1}{2} (\Delta \tilde{V}_{S}^{\mathrm{T}}(k)) R_{2}(k) (\Delta \tilde{V}_{S}(k)) + \sum_{i=1}^{\alpha_{P}} \lambda_{i} (\Delta V_{Pi}(k) - T_{PiG} \Delta V_{G}(k) - T_{PiS} \Delta V_{S}(k)), \qquad (15)$$

厕

那么式(12)的优化问题条件转化为

$$\frac{\partial L_1}{\partial \Delta V_G(k)} = -R_1(k)(\Delta \tilde{V}_G(k)) - \sum_{i=1}^{\alpha_P} \lambda_i T_{PiG} = 0,$$
(16)

$$\frac{\partial L_1}{\partial \Delta V_S(k)} = -R_2(k)(\Delta \tilde{V}_S(k)) - \sum_{i=1}^{\alpha_P} \lambda_i T_{PiS} = 0,$$
(17)

$$\frac{\partial L_1}{\partial \lambda_i} = \Delta V_{Pi}(k) - T_{PiG} \Delta V_G(k) - T_{PiS} \Delta V_S(k) = 0, \ i = 1, \cdots, \alpha_P.$$
(18)

由以上3式容易得到

$$\Delta V_G(k) = (R_1(k))^{-1} \sum_{i=1}^{\alpha_P} \lambda_i T_{PiG} + V_G^{ref}(k) - V_G(k),$$
(19)

$$\Delta V_S(k) = (R_2(k))^{-1} \sum_{i=1}^{\alpha_P} \lambda_i T_{PiS} + V_S^{\text{ref}}(k) - V_S(k),$$
(20)

$$\Delta V_{Pi}(k) = T_{PiG} \Delta V_G(k) + T_{PiS} \Delta V_S(k),$$

$$i = 1, \cdots, \alpha_P.$$
(21)

将式(19)和式(20)代入式(21),可以求出 λ_i ($i = 1, \dots, \alpha_P$),再将 λ_i 反代回式(19)和式(20),从而得 到发电机节点电压控制量 $\Delta V_G(k)$ 和无功补偿器 节点电压控制量 $\Delta V_S(k)$.

4.2 变压器节点的控制(Control of transformer buses)

在电力系统调度运行中,可以通过调节调压变 压器的变比来改变关键节点的电压值. 假设系统 中有α_T个调压变压器,而且在变压器变比发生变 化时,发电机节点和无功补偿装置节点的电压不 变,关键节点的无功注入不变,则可以列写出关键 节点的电压变化与变压器变比变化的关系:

$$\Delta Q_P(k) = \left[\frac{\partial \Delta Q_P(k)}{\partial V_P^T(k)}\right] \Delta V_P(k) + \left[\frac{\partial \Delta Q_P(k)}{\partial t^T(k)}\right] \Delta t(k) = 0. \quad (22)$$

其中: $\Delta Q_P(k)$ 为关键节点的无功功率改变量, $\Delta V_P(k)$ 为关键节点的电压改变量, $\Delta t(k)$ 为调压 变压器变比改变量, 且

$$\Delta t_i(k) = t_i^{\text{set}}(k) - t_i(k), \ i = 1, \cdots, \alpha_T.$$
 (23)

其中: $t_i^{\text{set}}(k)$ 代表控制后的变压器变比数值, $t_i(k)$ 代表控制前的变压器变比数值.据式(22)得

$$\Delta V_P(k) = \left[\frac{\partial \Delta Q_P(k)}{\partial V_P^T(k)}\right]^{-1} \left[\frac{\partial \Delta Q_P(k)}{\partial t^T(k)}\right] \Delta t(k).$$
(24)

设
$$L_{PP}(k) = \left[\frac{\partial \Delta Q_P(k)}{\partial V_P^T(k)}\right],$$
$$T_{PT}(k) = -L_{PP}^{-1}(k) \left[\frac{\partial \Delta Q_P(k)}{\partial t^T(k)}\right],$$

$$\Delta V_P(k) = T_{PT} \Delta t(k). \tag{25}$$

这里 T_{PT} 可以看成是关键节点的电压值相对调压 变压器变比的灵敏度系数矩阵, $T_{PT} \in \mathbb{R}^{\alpha_P \times \alpha_T}$.

调压变压器变比控制的目标是使得关键节点 的电压控制量等于ΔV_{Pi}(k),同时各变压器的变比 尽量接近优化潮流计算后的变比参考值,即满足 以下的优化问题:

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2} (\Delta \tilde{t}^{\mathrm{T}}(k)) R_3(k) (\Delta \tilde{t}(k)) \\ \text{s.t. } \Delta V_P(k) - T_{PT} \Delta t(k) = 0. \end{cases}$$
(26)

式中 $R_3(k)$ 为对角权矩阵,而且 $\Delta \tilde{t}(k)$ 为变比参考 控制值与实际控制值的偏差,即

$$\Delta t_i(k) = t_i^{\text{rer}}(k) - t_i^{\text{set}}(k), \ i = 1, \cdots, \alpha_T.$$
(27)

$$\exists \notin \underline{x} \pm \Delta k \text{ if } \exists \Delta k \text{ if } \exists \Delta k \text{ if } \exists \Delta k \text{ if } d a \text{ if }$$

那么优化问题式(25)条件的必要条件为

$$\frac{\partial L_2}{\partial \Delta t} = -R_3(k)(\Delta \tilde{t}(k)) - \sum_{i=1}^{\alpha_P} \lambda_i T_{PiT} = 0, \quad (29)$$

$$\frac{\partial L_2}{\partial L_2} = 0, \quad (29)$$

$$\frac{\partial D_2}{\partial \lambda_i} = \Delta V_{Pi}(k) - T_{Pit} \Delta t(k) = 0, \ i = 1, \cdots, \alpha_P.$$
(30)

由以上两式得

$$\Delta t(k) = (R_3(k))^{-1} \sum_{i=1}^{\alpha_P} \lambda_i T_{PiT} + t^{\text{ref}}(k) - t(k),$$
(31)

$$\Delta V_{Pi}(k) = T_{Pit} \Delta t(k), \ i = 1, \cdots, \alpha_P.$$
(32)

将式(30)代入式(31)可以求出 λ_i ($i = 1, \dots, \alpha_P$), 再将 λ_i 反代回式(30)就可以求出调节调压变压器 的变比改变量 $\Delta t(k)$.

5 静态混成电压控制底层(Bottom layer of static HAVC)

静态电压中间控制层通过计算得到的发电 机节点电压控制量 $\Delta V_G(k)$ 、无功补偿器节点电 压控制量 $\Delta V_S(k)$ 以及调压变压器的变比改变 量Δt(k)等,都将直接送至底层各电力元件的控制器,由各控制器实现对系统的控制,从而使得电力系统中关键节点电压值达到电压最高控制层中的设定值,以此来保证系统的电压安全性;同时减小系统的网络损耗,以满足最高层的经济性要求. 通过底层的控制,将消除最高层的离散事件,从而实现电力系统的安全经济运行.

6 仿真研究(Simulation research)

为了验证所提出的静态HAVC的正确性,笔 者进行计算机仿真研究.本文应用的仿真软件 是由中国电科院编制的《电力系统分析综合程 序(PSASP)》.

笔者对比研究了常规二级电压控制(secondary voltage control, SeVC)和混成电压控制的效果(仿 真系统采用IEEE-22母线系统,参见图2,系统参数 参见文献[14]). 在混成控制中,本文的控制目标是 使得最小模特征值的幅值从5.08增加到5.4,同时 尽量减少线路损耗,从而得到各控制节点的控制 量. 常规二级电压控制目标是使得关键节点的电 压与混成电压控制后的关键节点电压值相等,从 而得到它所对应的控制节点的控制量,具体控制 前后的数值参见表1.



Fig. 2 22 buses system of IEEE

	Ę	1	系	统	存	不	同	按	制	冬1	4.	下	的	对	EF.	表
ļ	\sim	1,	~1~	20	1-	~ I `	1.4	11	11-1	// /		1	н ј.	~1	۰.	v

Table 1	State values	under the	different	controls
	State values	under the	uniterent	controis

系统	信息	初始状态	SeVC	HAVC	
关键节点	11	1.00834	1.05989	1.06053	
关键节点	16	0.99849	1.03881	1.03934	
控制节点	1	1.00000	1.02380	0.99140	
控制节点	2	0.96910	1.02620	1.04350	
控制节点	3	1.00000	1.02610	0.97870	
控制节点	4	1.01605	1.03115	1.08955	
控制节点	5	1.04907	1.06797	1.07967	
控制节点	6	1.00000	1.03560	1.03560	
λ_{\min}	数值	5.08104	5.38564	5.40554	
λ_{\min}	增加比例	0.000%	5.995%	6.386%	
$S_{\rm loss}$	数值	0.47429	0.42391	0.41137	
$S_{\rm loss}$	减少比例	0.000%	10.62%	13.27%	

从表1中可以看出,静态混成电压控制的安全 性相对初始条件有了大幅度提高. 在混成自动 电压控制中,最小模特征值的幅值增加了6.38%, 而且大于常规二级电压控制的效果,同时混成自 动电压控制有效减少了系统的线路损耗,有功功 损耗减少了13.27%,有效地提高了系统运行的经 济性.

7 结论(Conclusion)

本文基于混成系统理念研究了静态电压控制 问题.首先构造了电力系统静态混成电压分层控 制模型.在该模型的基础上,分别给出了各层控制 器的设计方法.其中最高控制层考虑了电压安全 性和系统经济性两个优化目标,一旦有指标越限, 将形成离散事件,驱动控制环节形成电压控制指 令并传送至中间控制层;中间层依据最高层控制 指令建立优化指标函数,通过求解相应的优化问 题得到底层发电机节点和无功补偿器节点的控制 量,以及调压变压器的变比改变量,这些控制量进 一步送至底层;最后由底层的各电力元件的控制 器实现对系统电压状态的调控.最后的仿真研究 验证了所提出的静态混成自动电压控制系统的有 效性.

参考文献(References):

- TAYLOR G W. Power System Voltage Stability[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [2] Van CUTSM T, VOURNAS C. Voltage Stability of Electric Power Systems [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [3] STANKOVIC A, ILIC M, MARATUKULAM D. Recent results in secondary voltage control of power systems[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1991, 6(1): 94 – 101.
- [4] SANCHA J L, FERNANDEZ J L, ORTES A C, et al. Secondary voltage control: analysis, solutions and simulation results for the spanish transmission system[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1996, 11(2): 630 – 638.
- [5] LAGONOTTE P, SABONNADIERE J C, LEOST J Y, 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.
- [6] POPOVIC D S. Impact of secondary voltage control on voltage stability[J]. Electrical Power Systems Research, 1997, 40: 51 – 62.
- [7] ILIC M D, LIU Xiaojun, LEUNG G, et al. Improved secondary and new tertiary voltage control[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1995, 10(4): 1851 – 1862.
- [8] VU H, PRUVOT P, LAUNAY C, et al. An improved voltage control on large-scale power system[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1996, 11(3): 1295 – 1303.
- [9] POPOVIC D H, HILL D J, WU Qiang. Optimal voltage security control of power systems[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2002, 24(4): 305 – 320.
- [10] WU Qiang, POPOVIC D H, HILL D J, et al. Voltage security enhancement via coordinated control[J]. *IEEE Trans on Power System*, 2001, 16(1): 127 – 135.
- [11] 郑大钟,赵千川.离散事件动态系统[M].北京:清华大学出版社, 2002.

(ZHENG Dazhong, ZHAO Qianchuan. *Discrete Events Dynamical System*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)

- [12] GALAN S, BARTON P I. Dynamic optimization of hybrid systems[J]. Computers & Chemical Engineering, 1998, 22(Suppl): 183 – 190.
- [13] AVRAAM M P, SHAH N, PANTELIDES C C. Modeling and optimisation of general hybrid systems in the continuous time domain[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1998, 22(Suppl): 221 – 228.
- [14] HU W. Studies on the hybrid automatic voltage control(HAVC) system[D]. Beijing: Tsinghua Univwesity, 2002.
- [15] 张伯明, 陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.

(ZHANG Bomingg, CHEN Shousun. Advanced Analysis of Power Eetwork[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.)

(上接第894页)

- [8] 邓自立,高媛. 按对角阵加权信息融合Kalman滤波器[J]. 控制理 论与应用, 2005, 22(6): 870 – 874.
 (DENG Zili, GAO Yuan. Information fusion in Kalman filter weighted by diagonal matrices[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(6): 870 – 874.)
- [9] CARLSON N A. Federated Kalman filter simulation result[J]. J of the Institute of Navigation, 1994, 40(3): 124 – 128.
- [10] 许丽佳,陈阳舟.组合导航系统的模糊信息融合[J].系统仿真学报,2005,17(1):124-128.
 (XU Lijia, CHEN Yangzhou. Fuzzy information fusion in integrated navigation system[J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2005, 17(1):124-128.)
- 作者简介:

唐 磊 (1981—), 男, 南京理工大学计算机科学与技术学院模式识别与智能系统专业博士研究生, 目前研究方向为组合导航与控

制、数字图像处理等, E-mail: tang-lei2008@163.com;

(上接第901页)

- [8] KWONG R H, ZHU L. A stochastic framework of discrete event systems[EB/OL]. Systems Control Report 9608, University of Toronto, 1996. http: //www.control.toronto.edu/ people/ profs/ kwong/ publications. html.
- [9] 胡奇英, 刘勇. 离散事件系统静态稳定性的马氏决策过程方法[J]. 应用数学学报, 2001, 24(3): 377 – 383.
 (HU Qiying, LIU Yong. Markov decision processes methods in static stability of discrete event systems[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 2001, 24(3): 377 – 383.)
- [10] HU Q Y, YUE W Y. Two new optimal models for controlling discrete event systems[J]. *J of Industrial and Management Optimization*, 2005, 1(1): 65 – 80.
- [11] ARAPOSTATHIS A, KUMAR R, TANGIRALA S. Controlled Markov chains with safety upper bound[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(7): 1230 – 1234.
- [12] KWONG R H. Note on stochastic control and dynamic programming[EB/OL]. University of Toronto. http: //www.control. toronto.edu/people/profs/kwong/ 1652-2000. html.
- [13] 胡奇英,刘建庸. 马尔可夫决策过程引论[M]. 西安: 西安电子科技 大学出版社, 2000.

作者简介:

胡 伟 (1976—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事电力系统分析与仿真、电力系统控制、混成电力控制系统等方向的研究, E-mail: huwei@mail.tsinghua.edu.cn;

张雪敏 (1979—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事电力系统分 析与控制等方向的研究, E-mail: zxm01@mails.tsinghua.edu.cn;

梅生伟 (1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析、非 线性控制、智能控制, E-mail: meishengwei@mail.tsinghua.edu.cn;

卢强(1936—),男,教授,中国科学院院士,IEEE fellow,研究 方向为电力系统分析与控制、电力大系统灾变防治理论及应用,以及 绿色能源的开发利用, E-mail: luqiang@mail.tsinghua.edu.cn.

赵春霞 (1964—), 女, 南京理工大学计算机科学与技术学院院 长, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为模式识别、图像处理、人工智 能和机器人等, E-mail: zhaochx@mail.njust.edu.cn;

唐振民 (1961—), 男, 南京理工大学计算机科学与技术学院院 长, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为计算机视觉、语音识别、机器 人等, E-mail: tangzm@mail.njust.edu.cn;

成伟明 (1981—), 男, 南京理工大学计算机科学与技术学院模 式识别与智能系统专业博士研究生, 目前研究方向为机器人自主导 航和路径规划等, E-mail: cheng_wm1981@163.com;

张浩峰 (1983—), 男, 南京理工大学计算机科学与技术学院模 式识别与智能系统专业博士研究生, 目前研究方向为机器人立体视 觉、系统仿真、数字图像处理等, E-mail: zhanghf@mail.njust.edu.cn.

(HU Qiying, LIU Jianyong. An Introduction to Markov Decision Processes[M]. Xi'an: Press of Xidian University, 2000.)

[14] ROSS S. Introduction to Stochastic Dynamic Programming[M]. New York: Academic Press, 1983.

作者简介:

王 飞 (1977—), 男, 西安交通大学控制科学与工程专业 博士研究生, 主要研究方向为离散事件系统的监控理论, E-mail: feiw545@163.com;

冯祖仁 (1953—), 男, 现为西安交通大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为机器人控制、智能系统、机器人导航, E-mail: fzr9910@mail.xjtu.edu.cn;

胡奇英 (1965—), 男, 现为上海大学教授, 博士生导师, 主要研 究方向为离散事件系统的监控理论、供应链管理等, E-mail: huqiying@sina.com.