

# 二级电压控制对长期电压稳定性影响的仿真分析

刘明波, 陈 荃

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 根据长期电压慢动态的特点, 对长期电压稳定有重要影响的发电机、励磁电流限制器、电枢电流限制器、有载调压变压器、负荷和二级电压控制器建模, 从而建立整个系统的准稳态模型, 通过时域仿真获得系统动态演变过程中的一系列暂态平衡点, 从而可描绘出系统长期电压动态过程, 并实现快速仿真。以一个10机39节点系统为例, 通过仿真结果, 分析了二级电压控制对电压稳定的影响。计算结果表明, 在电压下降或失稳过程中, 二级电压控制可改善区域电压水平和提高系统电压稳定性。

**关键词:** 长期电压稳定; 准稳态模型; 时域仿真; 二级电压控制

**中图分类号:** TP273

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2007)04-0029-07

## Simulation Analysis of Effect of Secondary Voltage Control on Long-Term Voltage Stability

Liu Mingbo, Chen Quan

(College of Electric, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Based on slow dynamic characteristic, the components including generator, excitation current limiter, armature current limiter, transformer with on-load tap changer (OLTC), load and secondary voltage controller, which have great effect on long-term voltage stability, are modeled. Hence the quasi-steady-state model of a whole power system is constructed. A sequence of transient equilibrium points in dynamic evolution process are computed using time-domain simulation method, according to which dynamic process of long-term voltage stability can be depicted and its fast simulation can be realized. Also simulation results on a 10-machine 39-bus system are used to analyze effect of the secondary voltage controller on voltage stability. Results show that the secondary voltage controller can improve voltage profile of the controlled area and voltage stability during voltage drop or instability.

**Key words:** long-term voltage stability; quasi-steady-state model; time-domain simulation; secondary voltage control

## 0 引言

随着电力系统规模的不断增加, 电压崩溃被认为是造成不安全运行的主要原因之一。二级电压控制作为一种新型的电压控制方式, 有许多问题值得研究。这些问题包括: 如何建立二级电压控制系统的模型, 如何进行控制才能有效地防止系统电压失稳等。

文献[1]介绍了二级电压控制的主要原理, 提出了

划分控制区域、选择先导节点和控制发电机的新方法; 同时, 设计了一种新的动态二级电压控制器。文献[2]设计了一种新型的基于极坐标二值模糊逻辑规则的模糊逻辑二级电压控制器, 将先导节点的电压偏差及其微分作为模糊逻辑控制规则的前项输入, 推理出相应的电压控制信号, 然后引入比例积分器, 得到区域无功控制信号, 通过励磁控制, 实现对先导节点电压的控制。文献[3]从系统分析的角度, 阐述了扩展二

**收稿日期:** 2007-06-29

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50277013)

**作者简介:** 刘明波(1964-), 男, 湖南临澧人, 华南理工大学教授, 博士生导师, 主要从事电力系统优化, 运行与控制方面的研究;  
陈 荃(1981-), 女, 湖南益阳人, 华南理工大学硕士研究生, 主要研究方向为电力系统电压稳定分析与仿真。

级电压控制的基本原理,对某一实际系统进行了分析研究,设计了其扩展二级电压控制系统的方案与控制策略,并进行了仿真计算。文献[4]总结了二级电压控制的基本思想,提出了一种新的二级电压控制模型。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。

本文采用准稳态假设,采用与算法相适应的一套系统元件模型,通过系统的暂态平衡点,描绘出系统的电压曲线图,重点分析二级电压控制对长期电压稳定性的影响。

## 1 系统元件模型

### 1.1 同步发电机

发电机采用三阶模型:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega, \tag{1}$$

$$T_J \frac{d\omega}{dt} = \omega_0 (P_m - P_G), \tag{2}$$

$$T_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} = -E_q' + E_f - (x_d - x_d') i_d. \tag{3}$$

式中:  $\delta$  是转角;  $\omega$  是电气角速度偏差;  $E_q'$  是暂态电势;  $E_f$  是励磁电势;  $T_{d0}'$  是  $d$  轴开路暂态时间常数。

励磁系统由励磁机、调节器、端电压传感器和负荷补偿器、限制器和保护电路、电力系统稳定器 5 部分组成,如图 1 所示。

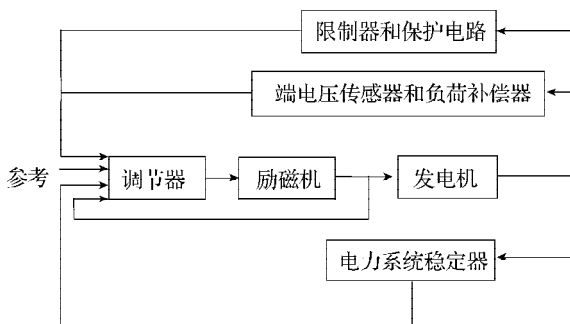


图 1 同步发电机励磁系统结构框图

Fig. 1 Structural diagram of excitation system of synchronous generator

图 2 给出了励磁器的简化模型,这里的  $V_R$  是电压调节器 (AVR) 的输出,  $K_L$ 、 $S_E$  是饱和因数,相应的微分方程是:

$$T_L \frac{dE_f}{dt} = -(K_L + S_E) E_f + V_R. \tag{4}$$

在系统扰动后,发电机的无功输出为了恢复系统的电压而增加。如果发电机在重有功负荷条件下,发电机就需要很大的励磁电流来维持终端电压,励磁器和发电机就会被推倒饱和范围。为了准确仿真这些事件,应该考虑发电机和励磁器的饱和作用。过励磁限

制器是决定重负荷电力系统的电压稳定限制条件的一个重要因素。

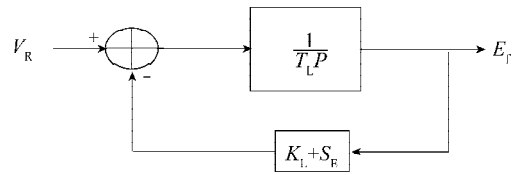


图 2 简化的具有饱和作用的励磁器

Fig. 2 Simplified exciter with saturation

### 1.2 电枢电流限制器

电枢发热与电枢电流的平方成正比,为防止电枢过热,发电机不允许持续过负荷运行。发电机都有一个运行电枢最大电流  $I_{amax}$ ,由于发电机机端电压运行有波动,因而  $I_{amax}$  一般取  $1.05I_N$ ,  $I_N$  为发电机的额定电流。即使发电机的机端电压更低,  $I_{amax}$  也不能超过  $1.05I_N$ 。

电枢电流限制器可用下式描述:

$$\frac{\sqrt{P_G^2 + Q_G^2}}{V_G} \leq I_{max}, \tag{5}$$

$$\text{即: } Q_G \leq \sqrt{(V_G I_{max})^2 - P_G^2}. \tag{6}$$

式中:  $P_G$  为发电机发出的有功功率;  $Q_G$  为发电机输出的无功功率。

### 1.3 有载调压变压器

有载调压变压器控制系统的模型如图 3 所示。

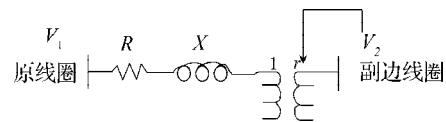


图 3 有载调压变压器控制系统

Fig. 3 Control system of transformer with OLTC

处于活动状态的有载调压变压器可以通过改变其分接头位置来提高或降低变比。用  $\Delta r$  表示有载调压变压器变比变化的步长,有载调压变压器在离散时刻动作,用  $t_k (k=1, 2, 3, \dots)$  表示这些时刻,给出递归公式如下:

$$t_{k+1} = t_k + \Delta T_k. \tag{7}$$

包括固定延迟和反时延迟的  $\Delta T_k$  公式如下:

$$\Delta T_k = \frac{T_d D}{|V_2 - V_2^0|} + T_f + T_m, \tag{8}$$

其中:  $V_2$  是受控电压;  $V_2^0$  是参考电压;  $D$  是动作死区;  $T_d$  是反时特性的最大延迟;  $T_f$  是固定延迟;  $T_m$  是分接头机械动作必要的时间。

分接头动作按照如下规律进行:

$$r_{k+1} = \begin{cases} r_k - \Delta r, & \text{若 } V_2 > V_2^0 + D, \text{ 且 } r_k < r_{kmax}; \\ r_k + \Delta r, & \text{若 } V_2 < V_2^0 - D, \text{ 且 } r_k > r_{kmin}; \\ r_k, & \text{其它情况。} \end{cases} \tag{9}$$

其中,  $r_{kmax}$ 、 $r_{kmin}$  分别是变比的上、下限。

### 1.4 动态负荷

负荷的动态特性对电压稳定具有极为关键的影响。文献[8]提出一种能描述负荷的非线性静态行为和功率恢复特性的非线性通用模型, 该模型能较好地描述负荷的低电压功率恢复特性, 在电压稳定性研究中颇受重视。文献[9]对此动态负荷模型进行了详细阐述, 该动态负荷模型用微分方程描述如下:

$$\begin{cases} T_p \frac{dP_r}{dt} + P_r = N_p(V), \\ N_p(V) = P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\alpha_s} - P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\alpha_t}, \end{cases} \quad (10)$$

$$P_d = P_r + P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\alpha_t}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} T_q \frac{dQ_r}{dt} + Q_r = N_q(V), \\ N_q(V) = Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\beta_s} - Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\beta_t}, \end{cases} \quad (12)$$

$$Q_d = Q_r + Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{\beta_t}. \quad (13)$$

式中:  $\alpha_s$  为有功静态电压特性指数;  $\alpha_t$  为有功暂态电压特性指数;  $\beta_s$  为无功静态电压特性指数;  $\beta_t$  为无功暂态电压特性指数;  $P_0$  为初始运行条件时的有功功率;  $P_d$  为负荷所吸收的有功功率;  $P_r$  为有功恢复功率;  $Q_0$  为初始运行条件时的无功功率;  $Q_d$  为负荷所吸收的无功功率;  $Q_r$  为无功恢复功率;  $T_p$  为有功负荷恢复时间常数;  $T_q$  为无功负荷恢复时间常数;  $V$  为负荷点的电压;  $V_0$  为初始运行条件时的电压。

### 1.5 二级电压控制器模型

电压崩溃的基本原因是由于电网中某些地区无功不足, 造成局部电压下降, 进而导致全网电压水平下降, 最终使系统发生电压崩溃。

由图4可见, 系统电压动态由2部分构成: 一级电压控制引起的一级电压动态; 二级电压控制引起的二级电压动态。其中影响系统一级电压动态的主要系统部件包括发电机及其励磁系统、负荷和网络, 二级电压控制只在励磁系统中引入附加控制量。

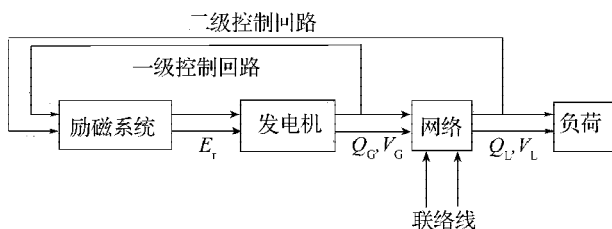


图4 采取二级电压控制时电力系统的基本结构  
Fig. 4 Structural diagram of power system when secondary voltage control is available

二级电压控制的主要目标是以某种协调的方式重新设置区域内各自动电压调节器(一级电压控制)的参考值, 使得各节点的电压满足运行要求。二级电压控制方案的设计将整个电力系统分成若干控制区域, 在每个控制区域中选出最关键的电压母线, 称为先导节点(Pilot bus), 该节点的电压变化能够反应整个区域内所有节点的电压变化情况, 而且, 当区域内各节点电压因受干扰发生变化之后, 如果将先导节点的电压恢复至干扰前的水平, 则能使得区域内其它节点的电压同样得到恢复。

本文采用如图5所示的二级电压控制器模型<sup>[10]</sup>, 包括1个中心控制器和2个发电机控制器。

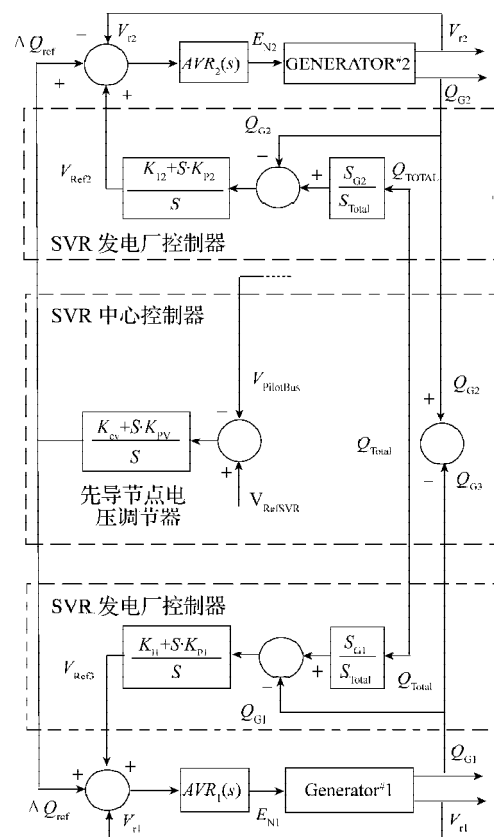


图5 二级电压控制器方案

Fig. 5 Scheme of secondary voltage controller

中心控制器应该安装在整个区域的控制中心, 包括1个调节先导节点电压的PI控制器和1个所有控制发电机瞬时无功功率的加法器。此中心控制器的输入是先导节点的电压幅值和各个控制发电机的无功功率; 输出为先导节点电压调节器(PI控制器)的输出和各个控制发电机所发无功的总和, 它们被送往各个控制发电机。

每个发电机控制器对应1个分布式PI控制器, 发电机控制器控制着发电机的无功输出。每个发电机控制器收到由中心控制器发出的2个信号, 同时返回各个发电机瞬时的无功出力。

图5中,  $K_{pV}$ 、 $K_{p1}$  和  $K_{p2}$  是放大倍数;  $V_{\text{pilot Bus}}$  为先导节点的电压幅值;  $V_{\text{Ref SVR}}$  为先导节点电压给定值;  $S_{Gi}$  表示每台发电机的容量;  $S_{\text{Total}}$  表示所有控制发电机组容量的总和;  $Q_{Gi}$  表示每台发电机发出的无功;  $Q_{\text{Total}}$  表示所有控制发电机组所发无功的总和;  $\Delta Q_{\text{ref}}$  表示区域无功功率信号。

假设发电机的无功没有超限, 且二级电压控制器中各限幅环节的输出等于输入, 则二级电压控制器可用下列一组微分方程(14)来描述:

$$\begin{cases} \Delta Q_k = K_{pV}(V_{\text{Ref SVR}} - V_{\text{Pilot Bus}}), \\ \frac{d\Delta Q_s}{dt} = K_{IV}(V_{\text{Ref SVR}} - V_{\text{Pilot Bus}}), \\ \Delta Q_{\text{ref}} = \Delta Q_k + \Delta Q_s \\ \Delta Q_{kl} = K_{p1} \left( \frac{S_{G1}}{S_{\text{Total}}} Q_{\text{Total}} - Q_{G1} \right), \\ \frac{d\Delta Q_{sl}}{dt} = K_{I1} \left( \frac{S_{G1}}{S_{\text{Total}}} Q_{\text{Total}} - Q_{G1} \right), \\ V_{\text{Ref1}} = \Delta Q_{kl} + \Delta Q_{sl}. \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $\Delta Q_k$ 、 $\Delta Q_s$ 、 $\Delta Q_{kl}$  和  $\Delta Q_{sl}$  为中间状态变量。

## 2 系统准稳态模型

将式(1)~(14)描述元件动态的方程与系统网络方程组合起来, 可以建立描述系统长期动态过程的微分-代数-差分方程组:

$$\begin{cases} 0 = g(x, y, z_c, z_d), \\ \dot{x} = f(x, y, z_c, z_d), \\ \dot{z}_c = h_c(x, y, z_c, z_d), \\ z_d(k+1) = h_d(x, y, z_c, z_d(k)). \end{cases} \quad (15)$$

其中: 第1个方程代表网络方程, 包含了负荷的静态电压特性和频率特性;

第2个方程描述机电暂态过程;

第3个方程描述二级电压控制和负荷恢复动态过程;

第4个方程描述了系统中长期的动态过程, 如带负载调压变压器动作;

$y$  代表代数变量列向量, 如节点电压幅值和相角;

$x$  代表描述机电暂态的状态变量列向量, 如  $\delta$ ,  $\omega$ ,  $E'_q$ ,  $E'_f$  等;

$z_c$  代表连续状态变量列向量, 如  $P_r$ ,  $Q_r$ ;

$z_d$  代表离散状态变量列向量, 如 OLTC 的变比。

考虑到长期电压失稳具有慢动态的特点, 于是把式(15)的第2个方程用其平衡点方程来替代, 令  $\dot{x}=0$ , 即认为对于长期电压稳定来说, 暂态范畴内的动态行为衰减很快, 因此, 可不考虑暂态动态行为衰减所需

要的时间。QSS 近似基于如下假设: 存在短期动态过程的稳定平衡点, 短期动态过程可在足够短的时间内达到平衡点。系统将在长期变量的推动下从一个暂态平衡点发展到另一个暂态平衡点, 长期变量的改变量可以看成是对系统的一个冲击。在这一系列小冲击下, 系统将不断得到一系列新的暂态平衡点。因而, 可以通过这一系列暂态平衡点来描述系统在长期的运动轨迹, 特别是电压薄弱区域节点的变化情况, 从而提供系统的长期动态变化的依据, 研究动态电压失稳的机理, 提出增强系统电压稳定性的措施。这就是所谓的准稳态仿真法, 它在静态方法的计算高效性和时域方法的准确性之间作了较好的折中。

将式(15)的第2个方程由其平衡方程代替, 则式(15)可转化为以下的一组方程:

$$\begin{cases} 0 = g(x, y, z_c, z_d), \\ 0 = f(x, y, z_c, z_d), \\ \dot{z}_c = h_c(x, y, z_c, z_d), \\ z_d(k+1) = h_d(x, y, z_c, z_d(k)). \end{cases} \quad (16)$$

## 3 准稳态仿真算法

时域仿真法具有以下优点: 详细计及元件的动态特性, 模拟精度较高; 仿真结果直观、清晰; 同时可以得到防止电压失稳的预防及校正措施等。但时域仿真法存在计算耗时, 计算量大的问题。

仿真计算时, 大步长虽然能提高计算速度, 但可能会带来较大的误差。文献[11]根据有载调压变压器在电压崩溃过程中起到的关键作用提出了新的步长控制方法, 加快了计算速度。

对文献[11]的步长控制方法进行简化后, 对步长控制的基本步骤如下:

1) 在计算时刻  $t_k$  判断各个长期控制装置的状态, 对不处于启动阈值范围内的各 OLTC 分别计算其下一次动作的延时间隔  $\Delta t_{ik}$ , 其中  $i$  为处于启动状态的装置;

2) 决定仿真步长  $\Delta t_k = \min_k \Delta t_{ik}$ ;

3) 在时刻  $t_{k+1} = t_k + \Delta t_{ik}$  处进行计算, 求取新的暂态平衡点;

4) 判断在新的暂态平衡状态下是否有其它长期控制装置动作。若有, 则估计其动作时间, 修正步长后返回步骤3); 否则,  $k+1$  后返回步骤1)。

仿真计算步骤如下:

1) 用常规牛顿法程序求出系统的初始运行状态;

2) 假设系统遭受扰动在  $t_k$  时刻, 用控制潮流程序求出扰动后的系统状态;

3) 在计算时刻  $t_k$  判断各个长期控制装置的状态, 存在处于启动状态的装置时决定仿真步长  $\Delta t_k = \min_k \Delta t_{ik}$ , 无则退出程序, 停止仿真;

4) 判断 OLTC 的分接头是否已达到极限位置, 是即重新决定仿真步长  $\Delta t_k$ ; 否则继续步骤 5);

5) 判断  $t_{k+1}=t_k+\Delta t_{ik}$  时刻是否已超过仿真总时间, 是即退出程序, 停止仿真; 否则用控制潮流程序求出  $t_{k+1}$  时刻的系统状态;

6) 判断励磁电流  $i_f$  是否已达到极限, 是令  $E_{qi}=E_{qNi}$ , 返回上一次暂态平衡状态, 运行控制潮流程序求出系统状态, 然后返回步骤 3), 否则直接返回步骤 3)。

### 4 算例分析

选择 New England 10机 39节点系统作为测试系统。在其节点 8 处引入另一个节点设为节点 40, 在节点 8 和 40 间加一条有载调压变压器支路, 然后把节点 8 上的负荷移到节点 40 上, 如图 6 所示。

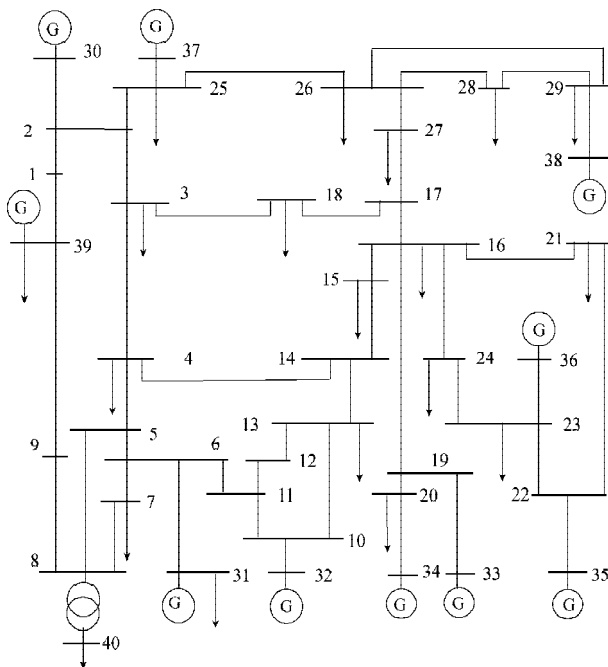


图 6 10 机 40 节点系统

Fig. 6 One-line diagram of 10-machine 40-bus system

仿真条件如下:

1) 节点 40 处的负荷采用式 (10) ~ (13) 所示的负荷动态模型, 其它负荷节点的负荷为恒功率特性。

2) OLTC 的参数设置为:

第一个分接头运动的延时: 30 s;

相继的分接头运动的延时: 5 s;

死区: 1% 母线电压标么值;

分接头范围:  $\pm 16$  级;

分接头步长:  $5/8 (=0.00625\text{p.u.})$ 。

3) 在各个控制区域的先导节点采用本文式 (14) 所示的二级电压控制器模型。

选节点 39 处的发电机内电势功率角为系统的角度参考点, 取为  $\delta_{39}=0$ 。采用文献[12]的嵌套分解算法, 把

该系统分为 4 个电压控制区域: 电压控制区 1 由 {1, 9, 39} 节点构成; 电压控制区 2 由 {28, 29, 38} 节点构成; 电压控制区 3 由 {4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 31, 32, 40} 节点构成; 电压控制区 4 由 {2, 3, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 33, 34, 35, 36, 37} 节点构成。本文仅在第 3 个电压控制区域安装二级电压控制器, 结合文献[1], 先导节点选为节点 7 和节点 10, 控制发电机为节点 31 和节点 32 的发电机。

#### 4.1 无二级电压控制

系统在初始时刻是稳定的, 所加扰动是: 增加节点 7 的无功负荷。设初始状态下节点 7 的无功负荷为  $Q_{L0}$ , 在负荷节点 7 上实施无功负荷微增。无功负荷微增按下式进行:

$$Q_L(t) = Q_{L0}(1 + k_q t), \tag{17}$$

式中,  $k_q$  为无功增长的比例因子 (取  $k_q=0.05$ )。

部分节点电压变化如表 1 所示。

表 1 不安装二级电压控制装置时部分节点电压变化情况  
Table 1 Voltages of some buses without secondary voltage controllers

时刻	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_{10}$	$V_{40}$
0 s	1.033 532	1.035 232	1.030 499	1.032 308	1.038 657	1.032 249
30 s	1.012 153	1.015 298	1.000 993	1.005 633	1.020 589	1.016 681
35 s	0.990 859	0.995 672	0.970 858	0.983 686	1.006 322	1.004 023
40 s	0.969 543	0.976 141	0.940 702	0.960 745	0.993 664	0.991 662
45 s	0.948 156	0.956 811	0.910 586	0.938 434	0.978 195	0.978 874
50 s	0.926 783	0.937 404	0.880 590	0.915 781	0.965 226	0.966 839
55 s	0.904 667	0.917 946	0.849 892	0.894 090	0.950 581	0.953 872
60 s	0.884 365	0.898 427	0.818 878	0.872 094	0.935 956	0.941 359
65 s	0.862 824	0.879 193	0.788 635	0.849 256	0.921 308	0.928 402
70 s	0.841 523	0.859 744	0.758 416	0.826 354	0.906 640	0.915 422

对控制发电机 31 的仿真计算结果如表 2。

表 2 不安装二级电压控制装置时控制发电机 31 的仿真结果  
Table 2 Simulation results of the generator 31 without secondary voltage controllers

时刻	$V_{31}$	$\theta_{31}$	$P_{31}$	$Q_{31}$	$E_{q31}$	$\delta_{31}$
0 s	0.994 565	0.433 340	5.251 441	1.436 418	2.107 914	1.248 877
30 s	0.975 994	0.428 768	5.281 543	1.542 221	2.136 628	1.242 487
35 s	0.959 875	0.425 469	5.311 649	1.647 969	2.165 327	1.236 675
40 s	0.943 721	0.422 306	5.342 567	1.753 205	2.193 325	1.230 854
45 s	0.927 760	0.419 082	5.372 633	1.858 906	2.221 693	1.225 051
50 s	0.911 484	0.415 684	5.405 636	1.964 174	2.250 165	1.219 154
55 s	0.895 196	0.412 428	5.435 777	2.069 873	2.278 487	1.213 339
60 s	0.879 217	0.409 431	5.465 835	2.172 571	2.307 644	1.207 576
65 s	0.862 964	0.406 016	5.495 852	2.277 775	2.335 747	1.201 713
70 s	0.846 514	0.402 589	5.522 351	2.388 642	2.366 337	1.196 012

对控制发电机 32 的仿真计算结果如表 3。

**表 3 不安装二级电压控制装置时控制发电机 32 的仿真结果**  
Table 3 Simulation results of the generator 32  
without secondary voltage controllers

时刻	$V_{32}$	$\theta_{32}$	$P_{32}$	$Q_{32}$	$E_{q32}$	$\delta_{32}$
0s	0.994 033	0.453 796	6.193 442	1.558 523	2.081 812	1.278 241
30s	0.978 493	0.450 577	6.196 899	1.645 961	2.109 377	1.271 776
35s	0.965 467	0.447 576	6.200 325	1.733 393	2.136 931	1.265 675
40s	0.951 767	0.444 569	6.203 724	1.820 691	2.164 492	1.259 621
45s	0.938 168	0.441 584	6.207 125	1.907 894	2.191 691	1.253 532
50s	0.924 546	0.438 579	6.210 521	1.994 878	2.219 247	1.247 531
55s	0.911 287	0.435 542	6.213 946	2.082 419	2.246 746	1.241 508
60s	0.897 563	0.432 547	6.217 348	2.169 835	2.274 280	1.235 499
65s	0.883 765	0.429 451	6.220 757	2.257 247	2.301 695	1.229 503
70s	0.869 984	0.426 412	6.224 560	2.345 467	2.329 896	1.223 411

由表 1 可以看出, 节点 7 无功负荷微增后, 部分节点的电压有了不同程度的下降。由表 2 可以看出, 故障发生后, 节点 31 的发电机所发有功和无功不断增多, 同时发电机节点电压持续下降。由表 3 可以看出, 故障发生后, 节点 32 的发电机所发有功和无功不断增多, 同时发电机节点电压持续下降。

#### 4.2 有二级电压控制

所加扰动同样是增加节点 7 的无功负荷, 电压变化如下表 4 所示。

**表 4 安装二级电压控制装置时部分节点电压变化情况**  
Table 4 Voltages of some buses with  
secondary voltage controllers

时刻	$V_5$	$V_6$	$V_7$	$V_8$	$V_{10}$	$V_{40}$
0s	1.033 532	1.035 232	1.030 499	1.032 308	1.038 657	1.032 249
30s	1.020 144	1.023 548	1.012 614	1.017 687	1.030 044	1.023 110
35s	1.007 154	1.012 069	0.995 461	1.000 699	1.022 023	1.016 851
40s	0.994 093	1.000 572	0.978 197	0.985 698	1.013 998	1.010 600
45s	0.980 907	0.989 065	0.960 683	0.970 679	1.006 039	1.004 012
50s	0.967 843	0.977 551	0.943 422	0.955 478	0.997 961	0.997 754
55s	0.954 748	0.966 049	0.926 154	0.940 482	0.989 907	0.991 207
60s	0.941 746	0.954 545	0.908 775	0.925 464	0.981 842	0.984 509
65s	0.928 655	0.943 047	0.891 377	0.910 414	0.973 765	0.977 807
70s	0.915 546	0.931 524	0.874 010	0.895 223	0.965 664	0.971 002

由表 4 可以看出, 安装二级电压控制装置后, 系统的节点电压情况有了很大的改善。这是因为二级电压控制装置能够根据本区域的负荷电压水平调整区域内一级电压控制器的动作, 系统内多余的无功功率被利用来提高电压下降点的电压, 这样系统内的无功功

率能在二级电压控制装置的控制下达到一个平衡的分配, 从而使系统电压维持在一个良好的水平。

对控制发电机 31 的仿真计算结果如表 5。

**表 5 安装二级电压控制装置时控制发电机 31 的仿真结果**  
Table 5 Simulation results of the generator 31  
with secondary voltage controllers

时刻	$V_{31}$	$\theta_{31}$	$P_{31}$	$Q_{31}$	$E_{q31}$	$\delta_{31}$
0s	0.994 565	0.433 341	5.251 441	1.436 418	2.107 914	1.248 877
30s	0.982 404	0.436 208	5.304 269	1.574 584	2.087 078	1.244 685
35s	0.974 278	0.439 072	5.356 968	1.709 040	2.066 571	1.240 527
40s	0.966 019	0.441 925	5.409 282	1.845 199	2.046 215	1.236 398
45s	0.957 991	0.444 791	5.460 978	1.981 214	2.025 899	1.232 241
50s	0.949 834	0.447 652	5.513 795	2.117 735	2.005 737	1.228 142
55s	0.941 678	0.450 466	5.566 636	2.254 686	1.985 321	1.223 989
60s	0.933 674	0.453 302	5.617 909	2.391 198	1.964 908	1.219 844
65s	0.925 223	0.456 121	5.670 751	2.527 703	1.944 512	1.215 696
70s	0.916 555	0.459 142	5.726 894	2.664 978	1.924 085	1.211 548

对控制发电机 32 的仿真计算结果如表 6。

**表 6 安装二级电压控制装置时控制发电机 32 的仿真结果**  
Table 6 Simulation results of the generator 32  
with secondary voltage controllers

时刻	$V_{32}$	$\theta_{32}$	$P_{32}$	$Q_{32}$	$E_{q32}$	$\delta_{32}$
0s	0.994 033	0.453 796	6.193 442	1.558 523	2.081 812	1.278 241
30s	0.984 544	0.457 321	6.225 665	1.670 135	2.068 462	1.275 579
35s	0.976 331	0.460 833	6.255 363	1.776 961	2.055 493	1.273 066
40s	0.968 065	0.464 329	6.285 395	1.890 449	2.042 556	1.270 538
45s	0.959 941	0.467 841	6.315 379	1.990 681	2.029 627	1.268 019
50s	0.951 580	0.471 139	6.344 477	2.100 573	2.016 756	1.265 526
55s	0.943 178	0.474 792	6.374 055	2.210 179	2.003 788	1.263 025
60s	0.934 772	0.478 291	6.403 967	2.319 166	1.990 724	1.260 509
65s	0.926 309	0.481 798	6.433 579	2.423 153	1.977 835	1.258 012
70s	0.917 844	0.485 524	6.465 451	2.544 850	1.964 840	1.255 484

由表 5 和表 6 可以看出, 安装二级电压控制装置后, 节点 31 和节点 32 的发电机所发有功和无功缓慢增加, 同时发电机节点电压持续上升。

从仿真结果可以看出, 二级电压控制能改善系统的电压水平, 并增强其电压稳定性。因为二级电压控制是一种区域协调控制, 能够根据本区域的负荷电压水平调整区域内一级电压控制器的动作, 从而达到增强电压稳定性的目的。其“区域性”体现在二级电压控制器中的先导节点电压调节器的区域无功信号  $\Delta Q_{ref}$  上, 因为  $\Delta Q_{ref}$  是根据先导节点电压偏差得到的, 所以代表着整个区域的电压水平状况; 而其“协调性”则

体现在二级电压控制器中的发电厂控制器上, 当区域中没有发电机无功越限时, 按照发电机容量的比例使无功功率在各发电机之间分配, 期望使系统中的发电机能保持无功功率的同步调节, 使区域无功信号  $\Delta Q_{\text{ref}}$  在没有越限的发电机之间重新分配。如果系统中缺乏这种以维持区域电压水平为目标的协调控制, 仅仅依靠各一级电压 / 无功控制器的运行实现电压调节, 就无法充分、有效地利用区域内已有的无功电源改善其电压稳定性。

在 New England 39 节点系统上的仿真结果证明: 在系统发生扰动期间, 二级电压控制器能够从区域电压稳定的角度出发, 调整各个电压控制器的电压参考值, 从而调整其无功出力, 为系统提供所需的电压支持, 使得受控区域的负荷电压水平维持在较好的状态, 从而提高了系统的电压稳定性。

## 5 结论

本文对采用准稳态假设后的中长期电压稳定的时域仿真方法进行了探索。发电机和负荷的建模是其重要环节。文章以 10 机 39 节点系统为例进行仿真计算, 结果表明在时域仿真计算和实际应用中, 二级电压控制都显示出对电力系统电压稳定性有很好的作用。在电压下降或失稳的过程中, 二级电压控制可以从区域电压稳定的角度出发, 协调本区域内各电压 / 无功支持源的无功出力, 改善区域电压水平和提高系统电压稳定性。

### 参考文献:

- [1] 孙元章, 王志芳, 姚小寅. 电力系统二级电压控制的研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(9): 9-14.
- [2] 王 琦, 周双喜, 朱凌志. 新型模糊逻辑二级电压控制器[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(20): 11-17.
- [3] 周孝法, 高 旭. 扩展二级电压控制系统的研究[J]. 电力系统自动化设备, 2003, 23(9): 31-35.
- [4] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 协调二级电压控制的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 19-24.
- [5] Feng Dong, Chowdhury B H, Crow M L, et al. Long-term voltage stability study using the quasi-steady state analysis method[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. Toronto: [s.n.], 2003: 2646-2651.
- [6] Van Cutsem T, Jacquemart Y, Marquet J N, et al. A comprehensive analysis of long-term voltage stability[J]. IEEE Trans on Power System, 1995, 10(3): 1173-1182.
- [7] 杭乃善, 周 航, 李如琦. 稳态控制潮流的设定空载频率及空载电压算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 23(12): 74-78.
- [8] 李欣然, 陈元新, 蒋铁铮, 等. 电力稳定研究中的负荷模型及其建模方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12(6): 9-13.
- [9] Karisson D, Hill D J. Modelling and identification of nonlinear dynamic load in power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 157-166.
- [10] Martins I N, Ferraz J C R, Gomes Jr S, et al. A Demonstration Example of Secondary Voltage Regulation: Dynamic Simulation and Continuation Power Flow Results[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 9(1): 791-796.
- [11] 徐泰山, 鲍艳红, 薛禹胜, 等. 长期电压稳定的快速仿真算法研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(24): 9-11.
- [12] 范 磊, 陈 珩. 二级电压控制研究(一)[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(12): 20-24.