

# 存在时滞影响的发电机励磁的 $H_\infty$ 控制

蔡超豪

(沈阳工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要:** 研究了存在广域控制时滞影响的发电机励磁系统的  $H_\infty$  控制, 讨论利用线性矩阵不等式(LMI)进行  $H_\infty$  控制器设计的方法及步骤。除考虑时滞影响外, 还计及了外部扰动和建模误差等不确定因素。以联接到远方系统的发电机为例, 采用远方反馈信号, 进行了存在时滞影响的发电机励磁的状态反馈  $H_\infty$  控制器设计。仿真及分析表明, 所设计的励磁控制器具有很好的对时滞的不敏感性, 可以抑制外部干扰, 保持电力系统的动态稳定。

**关键词:** 广域控制; 时滞; 发电机励磁;  $H_\infty$  控制; 线性矩阵不等式

## $H_\infty$ control of generator excitation with time-delay

CAI Chao-hao

(Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** The paper researches the  $H_\infty$  control of generator excitation with time-delay existed in the wide-area control, and discusses the method and step of the design of  $H_\infty$  controller by LMI technique. Except the influence of time-delay, the paper considers uncertain factors of external perturbations and modeling error. For an example, the  $H_\infty$  controller of excitation of a generator connected to distant power system with time-delay is designed. The results of analysis and simulation demonstrate that the controller can not only endure the time-delay, but also can raise the dynamic stability of power system.

**Key words:** wide-area control; time-delay; generator excitation;  $H_\infty$  control; LMI

中图分类号: TM712; TM761 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)08-0005-05

## 0 引言

广域测量系统(WAMS)已在包括我国在内的许多国家电网中得到了应用, 它能够对电网运行的诸多关键变量(如功角、频率、功率等)进行同步采集和监控, 为电力系统分析及其动态监测提供第一手资料。除了系统监测的功能外, 充分利用 WAMS 进行广域控制将是电网运行和控制技术的发展方向, 所以开展广域控制技术研究具有重要的理论和实际意义。

WAMS 给电力系统的运行和控制带来新的契机, 也带来了新的问题, 信号在 WAMS 中传输存在着明显的时间延迟(时滞)。时滞的存在使得电力系统的稳定分析和控制变得更加复杂和困难, 且也是系统不稳定和系统性能变差的根源之一。所以在引入 WAMS 的同时, 必须考虑时滞的影响<sup>[1]</sup>。

此外, 实际运行的工程系统都会受到不确定性的影响, 电力系统就是这样一类具有不确定性的系统。以线性最优控制和非线性控制为代表的现代控制理论一般是基于被控对象的精确数学模型来进行

控制器的设计的, 由于在系统建模时忽视了不确定性的影响, 从而使所设计的控制器难以达到预期的性能指标。为了弥补这一不足,  $H_\infty$  控制等现代鲁棒控制理论应运而生, 其出发点是在系统建模和控制器设计过程中考虑不确定性对系统的影响<sup>[2]</sup>。

线性矩阵不等式(LMI)理论是研究时滞影响和  $H_\infty$  控制的基本理论之一, 本文采用 LMI 理论来研究存在时滞和不确定性影响的发电机励磁的状态反馈  $H_\infty$  控制器设计。

发电机励磁系统是电力系统的重要组成部分, 励磁控制则是提高电力系统稳定性最经济有效的技术手段之一。电力系统稳定器(PSS)一般采用单变量反馈控制器和近似线性化的系统模型, 因此适宜于处理小干扰稳定问题; 本文采用多变量反馈控制器和直接反馈线性化(DFL)<sup>[3]</sup>的系统模型, 因而可处理大干扰稳定问题。

## 1 时滞系统的状态反馈 $H_\infty$ 控制

考虑广义时滞系统的状态空间描述为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + A_d x(t-d_1) + B_1 w(t) + \\ B_2 u(t) + B_d u(t-d_2) \\ z(t) = Cx(t) + C_d x(t-d_1) + D_{11} w(t) + \\ D_{12} u(t) + D_d u(t-d_2) \end{cases} \quad (1)$$

$$x(t) = 0, t < 0, \quad x(0) = x_0 \quad (2)$$

式中:  $x(t) \in R^n$  是系统的状态向量,  $u(t) \in R^m$  是控制输入,  $w(t) \in R^q$  是有限能量的外部扰动,  $z(t) \in R^p$  是被调输出,  $A$ 、 $A_d$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_d$ 、 $C$ 、 $C_d$ 、 $D_{11}$ 、 $D_{12}$ 、 $D_d$  是已知的实常数矩阵。时滞  $d_1$ 、 $d_2$  是定常时滞的滞后时间,  $\tau$  是已知常数, 满足

$$0 \leq d_i \leq \tau \quad (i=1,2) \quad (3)$$

对于时滞系统(1), 设计广域信号控制的状态反馈控制器, 具有状态反馈控制律

$$u(t) = Kx(t) \quad (4)$$

其中:  $u(t)$  是控制量,  $x(t)$  是状态向量,  $K \in R^{m \times n}$  是定常的反馈增益矩阵。将式(4)代入时滞系统(1), 得到从  $w(t)$  到  $z(t)$  的闭环系统为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_K x(t) + A_d x(t-d_1) + B_1 w(t) + \\ B_d Kx(t-d_2) \\ z(t) = C_K x(t) + C_d x(t-d_1) + D_{11} w(t) + \\ D_d Kx(t-d_2) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $A_K = A + B_2 K$ ,  $C_K = C + D_{12} K$ 。

我们关心的是对给定的正常数  $\gamma$ , 设计状态反馈控制器, 具有状态反馈控制律(4), 使得闭环系统(5)具有以下性质: ① 系统是渐近稳定的; ② 从外部扰动  $w(t)$  到被调输出  $z(t)$  的传递函数矩阵  $G_{wz}(s)$  的  $H_\infty$  范数不超过给定的常数  $\gamma$ , 则称系统(1)具有  $H_\infty$  性能  $\gamma$ 。  $\gamma$  反映了系统对外部扰动的抑制能力, 也称为系统对外部扰动的抑制度。  $\gamma$  越小, 表明系统的性能越好。

以下两条定理给出了时滞系统(1)存在  $H_\infty$  控制律的可行性条件及其求解方法<sup>[4]</sup>。

**定理 1** 对于系统(1)和给定的正常数  $\gamma$ , 时滞式(3)成立, 如果存在对称正定矩阵  $P$ 、 $R_1$  和  $R_2$ , 使得线性矩阵不等式(6)成立:

$$\begin{bmatrix} \phi & PA_d & PB_d & PB_1 & C_K^T \\ A_d^T P & -R_1 & 0 & 0 & C_d^T \\ B_d^T P & 0 & -R_2 & 0 & D_d^T \\ B_1^T P & 0 & 0 & -\gamma^2 I & D_{11}^T \\ C_K & C_d & D_d & D_{11} & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

式中:  $\phi = A_K^T P + PA_K + R_1 + K^T R_2 K$

则系统(1) 存在状态反馈  $H_\infty$  控制律。

**定理 2** 对于系统(1)和给定的正常数  $\gamma$ , 时滞式(3)成立, 如果存在对称正定矩阵  $Q$ 、 $S_1$  和  $S_2$  和矩阵  $M$ , 使得线性矩阵不等式(7)成立:

$$\begin{bmatrix} U_1 & B_1 & U_2 & M^T & Q \\ B_1^T & -\gamma^2 I & D_{11}^T & 0 & 0 \\ U_2^T & D_{11} & U_3 & 0 & 0 \\ M & 0 & 0 & -S_2 & 0 \\ Q & 0 & 0 & 0 & -S_1 \end{bmatrix} < 0 \quad (7)$$

其中:  $U_1 = QA^T + AQ + M^T B_2^T + B_2 M +$

$$A_d S_1 A_d^T + B_d S_2 B_d^T$$

$$U_2 = M^T D_{12}^T + QC^T$$

$$U_3 = -I + C_d S_1 C_d^T + D_d S_2 D_d^T$$

$$M = KP^{-1}$$

$$Q = P^{-1}$$

$$S_i = R_i^{-1}, \quad (i=1, 2)$$

则可用式(7)来求解系统(1)的  $H_\infty$  状态反馈控制律(式(4)中的反馈增益矩阵  $K$ 。

## 2 求时滞系统(1)的 $H_\infty$ 控制次优解、最优解的步骤

首先, 用定理 1 来研究系统(1)的  $H_\infty$  控制可行性: 采用 LMI 工具箱的内部描述方法<sup>[5]</sup>来表达线性矩阵不等式(6), 并用 lmisys1 来代表。将系统(1)的系数和式(6)的内部描述输入 Matlab 命令窗口, 应用求解器 feasp 研究其可行性。输入命令

$$[tmin, xfeas] = feasp(lmisys1) \quad (8)$$

如果  $tmin < 0$ , 则表示系统(1)存在  $\gamma$ -次优的可行解。调整  $\gamma$  值, 使  $\gamma$  值达到最小。

然后, 用定理 2 来求系统(1)的  $H_\infty$  控制的次优解、最优解: 将系统(1)的系数和线性矩阵不等式(7)的内部描述(用 lmisys2 代表)输入命令窗口。

① 用求解器 feasp 来求系统(1)的  $H_\infty$  控制的次优解, 输入命令组

$$\begin{aligned} [tmin, xfeas] &= feasp(lmisys2); \\ qq1 &= dec2mat(lmisys2, xfeas, Q); \\ mm1 &= dec2mat(lmisys2, xfeas, M); \\ K1 &= -mm1 \times inv(qq1) \end{aligned} \quad (9)$$

便得到系统(1)的  $\gamma$ -次优  $H_\infty$  控制的反馈增益矩阵  $K1$ 。

② 应用求解器 mincx 来求系统(1)的  $H_\infty$  控制最优解, 输入命令组

$$\begin{aligned} ndecr &= decnbr(lmisys2); \\ [V1, V2, V3, V4] &= defcx(lmisys2, ndecr, \\ & \quad Q, S1, S2, M); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & c = \text{mat2dec}(\text{lmissys2}, Q, S1, S2, V4); \\
 & \text{options} = [1e-5, 0, 0, 0, 0]; \\
 & [\text{copt}, \text{xopt}] = \text{mincx}(\text{lmissys2}, c, \text{options}); \\
 & \text{qq2} = \text{dec2mat}(\text{lmissys2}, \text{xopt}, Q); \\
 & \text{mm2} = \text{dec2mat}(\text{lmissys2}, \text{xopt}, M); \\
 & \mathbf{K2} = -\text{mm2} \times \text{inv}(\text{qq2})
 \end{aligned} \quad (10)$$

便得到系统(1)的最优H<sub>∞</sub>控制的反馈增益矩阵K2。

### 3 存在广域控制时滞影响的发电机励磁 H<sub>∞</sub> 控制器设计实例

#### 3.1 系统的数学模型

以联接到远方系统的发电机为例, 其示意图如图1所示, 状态方程如式(11)~(14)所示。

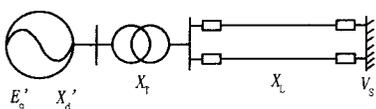


图1 联接到远方系统的发电机

Fig.1 A generator connected to distant power system

式(11)、(12)为发电机的转子运动方程, 式(13)为功率方程, 式(14)为转子绕组电磁动态方程。

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_0 \quad (11)$$

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{H}(\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H}(P_e - P_m) \quad (12)$$

$$P_e = \frac{E'_q V_s}{X_{d\Sigma}} \sin \delta \quad (13)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T_{d0}}(V_f - E_q) \quad (14)$$

式中:  $\delta$  为发电机的转子运行角, rad;  $\omega$  为发电机角速度, rad/s;  $P_e$  和  $P_m$  分别为发电机电功率和机械功率;  $H$  为机组转动惯量, s;  $D$  为阻尼系数;  $E_q$  为发电机空载电势;  $E'_q$  为发电机暂态电势;  $X_{d\Sigma}$  为发电机暂态电抗  $X'_d$ 、变压器电抗  $X_T$  和线路电抗  $X_L$  之和;  $T_{d0}$  为发电机定子绕组开路时励磁绕组的时间常数, s;  $V_s$  为远方电力系统母线电压;  $V_f$  为发电机端电压。式(14)中:  $V_f$  为待求的变量, 它是符合 H<sub>∞</sub> 控制规律的发电机励磁电压。以上未标单位的均用标么值。  $\omega_0 = 314$  rad/s, 假设  $P_m$  恒定,  $P_m = P_{m0} = P_{e0}$ 。

#### 3.2 数学模型的线性化及干扰信号设置

对式(13)求导并将式(14)代入得

$$\dot{P}_e = \frac{V_s}{X_{d\Sigma}} [E'_q \Delta\omega \cos \delta + \frac{1}{T_{d0}}(V_f - E_q) \sin \delta]$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\omega_0}{H} \dot{P}_e &= \frac{\omega_0}{H} \frac{V_s}{X_{d\Sigma}} [E'_q \Delta\omega \cos \delta + \\
 &\text{或} \\
 &\frac{1}{T_{d0}}(V_f - E_q) \sin \delta] = u
 \end{aligned} \quad (15)$$

采用直接反馈线性化, 指定式(15)左端为虚拟控制量  $u$ , 得

$$\dot{P}_e = \frac{H}{\omega_0} u \quad (16)$$

取  $\Delta\delta = \delta - \delta_0$ ,  $\Delta\omega = \omega - \omega_0$ ,  $\Delta P_e = P_e - P_m$ , 式(11)、(12)、(16)可写成

$$\begin{aligned}
 \dot{\Delta\delta} &= \Delta\omega \\
 \dot{\Delta\omega} &= -\frac{D}{H}\Delta\omega - \frac{\omega_0}{H}\Delta P_e + d_3 w \\
 \dot{\Delta P}_e &= d_4 w + \frac{H}{\omega_0} u
 \end{aligned} \quad (17)$$

式中:  $d_3 w$ 、 $d_4 w$  为采取 H<sub>∞</sub> 控制方法时设置的干扰信号, 包括扰动转矩和建模误差等引起的等价扰动。

将式(17)写成矩阵形式

$$\dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u \quad (18)$$

式中:  $x = [\Delta\delta \quad \Delta\omega \quad \Delta P_e]^T$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{H} & -\frac{\omega_0}{H} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = [0 \quad d_3 \quad d_4]^T$$

$$B_2 = [0 \quad 0 \quad \frac{H}{\omega_0}]^T$$

定义动态性能评价信号为

$$z = Cx + D_{11} w + D_{12} u \quad (19)$$

$$\text{式中: } C = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_{11} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$D_{12} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad \gamma_1]^T$$

$C$ 、 $D_{11}$ 、 $D_{12}$  为权矩阵,  $q_i \geq 0$  ( $i=1,2,3$ ) 和  $\gamma_1 > 0$  为加权系数。调整加权系数, 选择最优的性能组合, 包括电力系统稳定性、控制系统的低能量消耗等。

#### 3.3 存在广域控制时滞影响的发电机系统线性化模型及其参数

存在广域控制时滞影响的发电机系统线性化模型可由式(18)、(19)增加时滞项构成, 它与式(1)形式相同, 为时滞微分一代数方程组。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + A_d x(t-d_1) + B_1 w(t) + \\ \quad B_2 u(t) + B_d u(t-d_2) \\ z(t) = Cx(t) + C_d x(t-d_1) + D_1 w(t) + \\ \quad D_2 u(t) + D_d u(t-d_2) \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $x = [\Delta\delta \quad \Delta\omega \quad \Delta P_e]^T$ 。由于取远方发电机母线的  $\delta$ 、 $\omega$ 、 $P_e$  为反馈信号, 所以存在信号传输时滞, 设它们具有相同的时滞。

在图 1 中, 设联接到远方 500 kV 系统的发电机为 600 MW、20 kV,  $H=8$  s,  $D=5$ ,  $X_d=2.543$ ,  $X'_d=0.318$ ,  $T_{d0}=10$  s,  $X_T=0.1$ ,  $X_L=0.73$ 。初始运行点为:  $P_{e0}=0.75$ ,  $\omega_0=314$  rad/s,  $\delta_0=87.3^\circ$ ,  $V_S=1$  (以上未标单位的均为额定标么值)<sup>[6]</sup>。取式(18)的干扰信号系数  $d_3=d_4=0.1$ ; 取式(20)的  $A_d=0.1 \times A$ ,  $B_d=0$ ,  $C_d=0$ ,  $D_d=0$ , 时滞上界  $d_1=d_2=0.1$ 。给定  $\gamma=1.0$ 。

将式(4)展开得状态反馈控制律为

$$u = Kx = [k_\delta \quad k_\omega \quad k_p] [\Delta\delta \quad \Delta\omega \quad \Delta P_e]^T = k_\delta \Delta\delta + k_\omega \Delta\omega + k_p \Delta P_e \quad (21)$$

$K$  为待求的反馈增益矩阵。如果求得  $K$ , 便可由式(15)、(21)解得待求的励磁控制电压

$$V_f = E_q - T_{d0} E'_q \frac{\cos \delta}{\sin \delta} \Delta\omega + \frac{H}{\omega_0} T_{d0} \frac{E'_q}{P_c} Kx \quad (22)$$

暂时设  $K = [k_\delta \quad k_\omega \quad k_p] = [5 \quad 1 \quad -100]$ , 应用第 1、

2 节的理论和步骤求解  $K$ 。

### 3.4 考虑广域控制时滞影响的励磁系统 $H_\infty$ 控制的可行性

利用定理 1 来研究时滞励磁系统  $H_\infty$  控制的可行性, 将式(20)的各系数以及式(6)的内部描述输入 Matlab 命令窗口,  $P \in R^{3 \times 3}$ ,  $R_1 \in R^{3 \times 3}$ ,  $R_2 \in R^{1 \times 1}$ , 用求解器 feasp 进行研究。输入命令

$$[tmin, xfeas] = feasp(lmisys1)$$

得  $tmin = -0.0171 < 0$ ,  $\gamma = 1.0$ , 表示式(20)存在  $\gamma$ -次优可行解。调整  $\gamma$  值, 使达到最小。

### 3.5 时滞励磁系统 $H_\infty$ 控制的次优、最优反馈增益矩阵

利用定理 2 求时滞励磁系统  $H_\infty$  控制的次优、最优增益矩阵, 将式(20)各系数以及式(7)的内部描述输入 Matlab 命令窗口,  $Q \in R^{3 \times 3}$ ,  $S_1 \in R^{3 \times 3}$ ,  $S_2 \in R^{1 \times 1}$ ,  $M \in R^{1 \times 3}$ 。

① 应用求解器 feasp 求次优反馈增益矩阵。输入命令组式(9), 得

$$K1 = [0.3885, 0.8640, -867.8479], \quad \gamma = 1$$

② 应用求解器 mincx 求最优反馈增益矩阵。利用 Matlab 遗传算法工具箱(Gatool)<sup>[7]</sup>进行优化, 得式(19)评价信号的加权系数:  $q_1=0.1373$ ,  $q_2=0.3581$ ,  $q_3=0.0047$ ,  $\gamma_1=0.2$ ; 输入命令组式(10), 得

$$K2 = [0.9961, -0.0071, -48.7444]$$

取  $K=K2$ , 由式(22), 解得考虑时滞影响的符合  $H_\infty$  控制规律的励磁电压  $V_f$ 。

## 4 对计算结果的分析与时域仿真

由  $K2$  值可计算得: ① 闭环系统(5)的状态空间的特征值(eig)为  $-1.3266, -0.2585 \pm j0.0909$ , 均在左半开复平面内, 所以闭环系统是渐近稳定的; ② 闭环系统(5)的  $H_\infty$  范数(normhinf)为 0.9394, 不超过给定的常数  $\gamma(\gamma=1)$ 。所以  $K2$  是系统(1)的一个最优状态反馈  $H_\infty$  控制器的增益矩阵。

用所得的  $K2$  值进行仿真, 扰动为  $t=1.0$  s 时发电机功率突然增加 10%。应用 Pade 逼近法<sup>[8]</sup>作出不同时滞  $d$  的功率  $P$  变化曲线如图 2 所示。从图中可以看出, 所得到的控制器对于时滞达到 300 ms 的电力系统, 仍能有效地保持稳定。

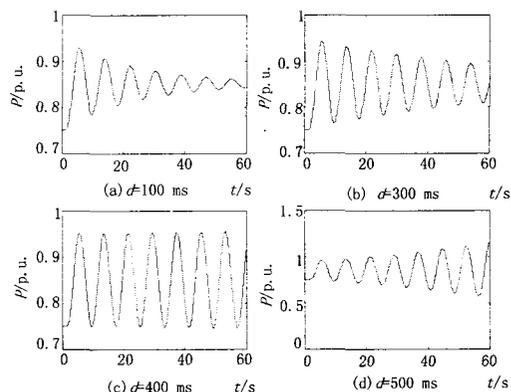


图 2 不同时滞  $d$  的功率  $P$  变化曲线

Fig.2 Power curve of different time-delay

## 5 结语

本文研究了存在广域测量系统时滞影响的发电机励磁的  $H_\infty$  控制, 用实例说明了广域控制励磁系统  $H_\infty$  控制器的设计方法, 设计过程中考虑了不确定性对系统的影响。分析和仿真表明, 所设计的控制器具有较好的时滞不敏感性, 能有效地抑制外部扰动, 提高互联系统的动态稳定。文章对设计步骤作了详细的介绍, 可以推广应用于时滞系统其他设备的  $H_\infty$  状态反馈控制器设计。

## 参考文献

- [1] 江全元, 张鹏翔, 曹一家. 计及反馈信号时滞影响的广域 FACTS 阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 82-88.  
JIANG Quan-yuan, ZHANG Peng-xiang, CAO Yi-jia. Wide-area FACTS Damping Control in Consideration of Feedback Signals Time Delays[M]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 82-88.
- [2] 申铁龙.  $H_{\infty}$ 控制理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.  
SHEN Tie-long.  $H_{\infty}$  Control Theory and Its Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.
- [3] 高龙, Hill D J, 王幼毅, 等. 非线性系统的 DFL 及隐动态[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1996, 36(9): 1-8.  
GAO Long, Hill D J, WANG You-yi, et al. Direct Feedback Linearization of Nonlinear Control systems and the Hidden Dynamics[J]. Journal of Tsinghua University (Sci & Tech), 1996, 36(9): 1-8.
- [4] 王德进.  $H_2$  和  $H_{\infty}$  优化控制理论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.  
WANG De-jin.  $H_2$  and  $H_{\infty}$  Optimal Control Theory[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001.
- [5] 俞立. 鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法[M].

北京: 清华大学出版社, 2002.

- YU Li. Robust Control—Linear Matrix Inequality Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [6] 蔡超豪. 非线性  $H_{\infty}$  励磁控制器的设计[J]. 电网技术, 2003, 27(3): 50-52.  
CAI Chao-hao. Design of Non-linear  $H_{\infty}$  Excitation Controller[J]. Power System Technology, 2003, 27(3): 50-52.
- [7] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.  
LEI Ying-jie, ZHANG Shan-wen, LI Xu-wu, et al. Genetic Algorithm Toolbox—for Use with Matlab[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005.
- [8] 石颖, 王成山. 时间延迟对电力系统稳定器性能的影响[J]. 继电器, 2006, 34(13): 21-24.  
SHI Jie, WANG Cheng-shan. Time Delay Impact on the Performance of the Power System Stabilizer[J]. Relay, 2006, 34(13): 21-24.

收稿日期: 2008-06-05; 修回日期: 2008-06-12

作者简介:

蔡超豪(1965-), 男, 教授, 从事电力系统供用电及其控制的教学与研究. E-mail: lorermr@yahoo.com.cn

(上接第 4 页 continued from page 4)

(2) 本文提出的关键元件单调性研究能够正确地进行网络能力评价和安全监视, 其功能与传统的关键输电断面监视一致, 并且该方法更加简单直观。

至此, 该系列研究在给定的运行模式下, 就关键元件及其单调性的概念与基础、机理与证明以及实际应用等进行了有益的探索。可以肯定的是, 运行模式规律是存在的。表现在负荷有其自身的变化规律, 发电计划根据一定的负荷变化规律也有对应的调度规律, 结合超短期负荷预测和发电调度规律, 建立一定延续时间的运行模式是没有问题的。当然其它诸如输电能力计算、静态电压稳定评估、以及输电元件载荷定值等, 本身就是给定模式下进行的。可见, 本研究有较宽泛的应用领域和对象。

## 参考文献

- [1] 常康, 韩学山, 王孟夏, 等. 电网关键元件及其单调性研究 I: 概念与基础[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 1-5.  
CHANG Kang, HAN Xue-shan, WANG Meng-xia, et al. Study on the Crucial Element and Its Monotone in Power Grid Part I: Concepts and Foundation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(6): 1-5.
- [2] 常康, 韩学山, 王孟夏, 等. 电网关键元件及其单调性研究 II: 机理与证明[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 1-6.

CHANG Kang, HAN Xue-shan, WANG Meng-xia, et al. Study on the Crucial Element and Its Monotone in Power Grid Part II: Mechanism and Certification[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 1-6.

- [3] 张强, 韩学山, 等. 安全经济调度与均匀调度间关系分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(2): 84-89.  
ZHANG Qiang, HAN Xue-shan, et al. Analysis of Security Economic Dispatch and Homogeneous Dispatch[J]. The Proc of CSU-EPSC, 2005, 17(2): 84-89.
- [4] 韩力, 韩学山, 等. 多节点超短期负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 30-34.  
HAN Li, HAN Xue-shan, et al. Method for Ultra-short Term Multi-node Load Forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 30-34.

收稿日期: 2008-05-12; 修回日期: 2008-06-14

作者简介:

常康(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: ckang718@163.com

韩学山(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统优化调度、EMS、电力市场领域的研究和教学工作;

韩力(1979-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统调度自动化。