

电力系统切换动态建模与励磁控制研究

李健勇¹, 赵 峰², 丁青青³

(1. 郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘 要: 针对紧急情况下切机操作后的励磁控制问题, 建立了 IEEE 三机互联电力系统的切换控制数学模型, 通过预置状态反馈完成了系统的耗散 Hamilton 实现并设计了切换励磁控制器. 将切换子系统的 Hamilton 函数作为多 Lyapunov 函数, 证明了闭环系统在任意切换路径下的渐近稳定性. 仿真结果表明所设计的切换励磁控制器能有效提高电力系统的暂态稳定性.

关键词: 电力系统; 切换系统; 耗散 Hamilton 实现; 励磁控制

中图分类号: TP273 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.002

0 引言

区域电网互联发展和用电负荷增加使电网事故频频发生, 互联电网大停电带来的巨大社会影响和经济损失迫使世界各国将电力系统安全提升到国家安全的高度. 当电力系统的安全稳定运行条件遭到破坏而进入紧急状态或极端紧急状态时, 需要采取紧急控制措施维持系统的稳定性^[1-3].

目前电力系统紧急控制研究主要集中在切机切负荷算法、混杂系统建模和稳定性分析等方面^[4-6]. 在基于反馈控制的电力系统紧急控制研究中, J. N. Peng 等研究了切机操作与超导储能装置的协调控制问题^[7], 文献^[8]提出了高压直流输电设备的紧急支援控制策略.

励磁控制是提高电力系统暂态稳定性的重要手段^[9-10]. 由于 Hamilton 函数方法能够充分利用系统内在的结构特点进行控制器设计, 近年来在电力系统励磁控制研究中得到了成功应用^[11-12]. 注意到切换子系统的 Hamilton 函数在一定条件下能够构成多 Lyapunov 函数, Zhu 等研究了切换耗散 Hamilton 系统在任意切换路径下的稳定问题, 提出了两机电力系统的切换动态模型和稳定性^[13-14].

笔者研究 IEEE 三机互联电力系统在紧急状态下的切换系统建模和励磁控制问题, 建立了电力系统的切换非线性系统模型, 基于耗散 Hamilton 实现设计了切换控制器, 证明了闭环系统的渐近稳定性. 仿真结果验证了笔者所设计切换控制器的有效性.

1 电力系统切换动态模型

图 1 为 IEEE 三机互联电力系统.

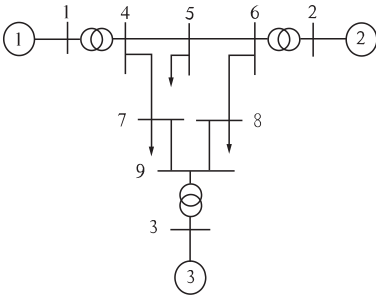


图 1 三机区域互联电力系统结构图

Fig. 1 Configuration of a three-machine multi-area interconnected power system

假设在紧急情况下, 系统中至少有 1 台发电机工作, 则图 1 所示电力系统可能的工作状态有 7 种.

I. 切除 1 台发电机: (a) $i = 1, 2; j = 3$; (b) i

收稿日期: 2014-03-06; 修订日期: 2014-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61473265); 河南省教育厅科学技术重点研究项目 (13A520379)

作者简介: 李健勇 (1969-), 男, 河南孟州人, 郑州轻工业学院, 副教授, 硕士, 主要从事复杂网络控制及电力系统稳定控制研究, E-mail: lijianyong@zzuli.edu.cn.

通讯作者: 赵峰, E-mail: zhaofeng@zzu.edu.cn.

$= 1, 3; j = 2; (c)i = 2, 3; j = 1.$

Ⅱ. 切除2台发电机: $(e)i = 1; j = 2, 3; (f)i = 2; j = 1, 3; (g)i = 3; j = 1, 2.$

Ⅲ. 3台发电机同时工作: $(h)i = 1, 2, 3.$

记 $i \in \{1, 2, 3\}$ 为发电机编号, $j \in \{0, 1\}$ 表示发电机的运行状态, 其中 $j = 0$ 表示电机被切除, $j = 1$ 表示电机联网运行.

(1) 发电机联网运行时, 其动态可表示为

$$\begin{cases} \dot{\delta}_{ij} = \omega_{ij} - \omega_0, \\ \dot{\omega}_{ij} = \frac{\omega_0}{M_i} P_{mi} - \frac{D_i}{M_i} (\omega_{ij} - \omega_0) - \frac{\omega_0}{M_i} P_{eij}, \\ \dot{E}'_{qij} = -\frac{E'_{qij}}{T'_{d0i}} - \frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}} I_{dij} + \frac{E_{fdij}}{T'_{d0i}}. \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$P_{eij} = G_{ii} E'^2_{qij} + E'_{qij} \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} E'_{qkj} \sin(\delta_{ij} - \delta_{kj}), \quad (2)$$

$$I_{dij} = -E'_{qij} B_{ii} + \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} E'_{qkj} \cos(\delta_{ij} - \delta_{kj}). \quad (3)$$

式中: δ_{ij} 为发电机功角; ω_{ij} 为转子角速度; ω_0 为转子同步角速度; P_{mi} 为机械功率; P_{eij} 为电磁功率; M_i 为转动惯量; D_i 为阻尼系数; E'_{qij} 为 x'_{di} 后电势; T'_{d0i} 为 d 轴开环暂态时间常数; x_{di} 和 x'_{di} 分别为 d 轴电抗和暂态电抗; I_{dij} 为 d 轴电流; G_{ii} 和 B_{ii} 分别为第 i 台发电机节点电导和电纳; B_{ik} 为第 i 台和第 k 台发电机节点互电纳; E_{fdij} 为励磁电压.

(2) 当发电机被切除时, 其动态可以表示为

$$\dot{\delta}_{ij} = 0, \dot{\omega}_{ij} = 0, \dot{E}'_{qij} = 0. \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [x_{1j1}, x_{1j2}, x_{1j3}; x_{2j1}, x_{2j2}, x_{2j3}; x_{3j1}, x_{3j2}, x_{3j3}]^T \\ &= [\delta_{1j}, \omega_{1j} - \omega_0, E'_{q1j}; \delta_{2j}, \omega_{2j} - \omega_0, E'_{q2j}; \\ &\quad \delta_{3j}, \omega_{3j} - \omega_0, E'_{q3j}]^T, \end{aligned}$$

$$\mathbf{f}_{\lambda(t)}(\mathbf{x}) = [f_{1j1}(\mathbf{x}), f_{1j2}(\mathbf{x}), f_{1j3}(\mathbf{x}); f_{2j1}(\mathbf{x}), f_{2j2}(\mathbf{x}), f_{2j3}(\mathbf{x}); f_{3j1}(\mathbf{x}), f_{3j2}(\mathbf{x}), f_{3j3}(\mathbf{x})]^T$$

$$\mathbf{g}_{\lambda(t)}(\mathbf{x}) = [g_{1j}, g_{2j}, g_{3j}]^T$$

其中: 当 $j = 1$ 时, $f_{ij1}(\mathbf{x}) = \omega_{ij} - \omega_0$, $f_{ij2}(\mathbf{x}) = \frac{\omega_0}{M_i} (P_{mi} - P_{eij}) - \frac{D_i}{M_i} (\omega_{ij} - \omega_0)$, $f_{ij3}(\mathbf{x}) = -\frac{E'_{qij}}{T'_{d0i}} -$

$$\frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}} I_{dij}, \mathbf{g}_{1j} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{g}_{2j} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{g}_{3j} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \text{当 } j = 0 \text{ 时, } f_{ij1} = 0, f_{ij2} = 0, f_{ij3} =$$

$$0, g_{ij} = 0_{3 \times 3}. \mathbf{u} = [u_{1j}, u_{2j}, u_{3j}]^T, u_{ij} = \frac{E_{fdij}}{T'_{d0i}}. \text{ 同时}$$

为书写方便, 令 $a_i = \frac{\omega_0}{M_i} P_{mi}$, $b_i = \frac{D_i}{M_i}$, $c_i = \frac{\omega_0}{M_i} G_{ii}$, $d_i = \frac{\omega_0}{M_i}$, $e_i = \frac{1}{T'_{d0i}}$, $h_i = \frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}}$. 综合式(1) ~ (4)

可以得到三机互联电力系统的切换非线性数学模型

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}_{\lambda(t)}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_{\lambda(t)} \mathbf{u}. \quad (5)$$

式中: $\lambda(t): [t_0, +\infty) \rightarrow \Lambda = \{1, \dots, 7\}$ 为切换路径.

2 耗散 Hamilton 实现

采用 Hamilton 函数方法对系统进行稳定性分析和控制器设计的关键步骤是完成受控系统的耗散实现.

定义1 考虑切换非线性系统(5), 如果存在连续可微函数 $H_{\lambda(t)}(\mathbf{x})$ 使得系统为

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{J}_{\lambda(t)} - \mathbf{R}_{\lambda(t)}) \frac{\partial H_{\lambda(t)}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}_{\lambda(t)}(\mathbf{x}) \mathbf{u}. \quad (6)$$

式中: $\mathbf{J}_{\lambda(t)}(\mathbf{x})$ 为反对称矩阵; $\mathbf{R}_{\lambda(t)}(\mathbf{x})$ 为半正定矩阵, 则系统(6)称为系统的耗散 Hamilton 实现, $H_{\lambda(t)}(\mathbf{x})$ 称为切换子系统的 Hamilton 函数.

为完成电力系统切换数学模型的耗散 Hamilton 实现, 引入预置状态反馈控制^[12]

$$u_{ij} = -\frac{2c_i h_i}{d_i} x_{ij1} x_{ij3} + v_{ij}. \quad (7)$$

则在预置反馈控制(7)作用下, 系统动态可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_{ij1} = x_{ij2}, \\ \dot{x}_{ij2} = a_i - b_i x_{ij2} - c_i x_{ij3}^2 - d_i x_{ij3} \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \sin(x_{ij1} - x_{kj1}), \\ \dot{x}_{ij3} = -(e_i + h_i B_{ii}) x_{ij3} + v_{ij} + h_i \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \cos(x_{ij1} - x_{kj1}). \end{cases} \quad (8)$$

选择子系统的 Hamilton 函数为

$$\begin{aligned} H(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^3 \left[-\frac{a_i}{b_i} x_{ij1} + \frac{c_i}{d_i} x_{ij1} x_{ij3}^2 + \frac{1}{2d_i} x_{ij2}^2 + \frac{e_i + h_i B_{ii}}{2h_i} x_{ij3}^2 \right] - \sum_{i=1}^3 x_{ij3} \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \cos(x_{ij1} - x_{kj1}). \end{aligned} \quad (9)$$

则当 $j = 1$ 时, 有

$$\frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial x_{ij1}} = -\frac{a_i}{d_i} + \frac{c_i}{d_i} x_{ij3}^2 + x_{ij3} \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \sin(x_{ij1} - x_{kj1}), \quad (10)$$

$$\frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial x_{ij2}} = \frac{1}{d_i} x_{ij2}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial H(x)}{\partial x_{ij3}} = 2 \frac{c_i}{d_i} x_{ij1} x_{ij3} + \frac{e_i + h_i B_{ii}}{h_i} x_{ij3} - \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \cos(x_{ij1} - x_{kj1}); \quad (12)$$

当 $j = 0$ 时,有

$$\frac{\partial H(x)}{\partial x_{ij1}} = 0, \frac{\partial H(x)}{\partial x_{ij2}} = 0, \frac{\partial H(x)}{\partial x_{ij3}} = 0. \quad (13)$$

从而电力系统切换数学模型可以转化为

$$\dot{x} = [J_{\lambda(t)} - R_{\lambda(t)}] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g_{\lambda(t)} u, \quad (14)$$

其中: $J_{\lambda(t)} = \text{diag}\{J_{ij}(x), J_{ij}(x), J_{ij}(x)\}$, $R_{\lambda(t)} = \text{diag}\{R_{ij}(x), R_{ij}(x), R_{ij}(x)\}$.

当 $j = 1$ 时,

$$\begin{cases} J_{ij}(x) = \begin{bmatrix} 0 & d_i & 0 \\ -d_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ R_{ij}(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_i d_i & 0 \\ 0 & 0 & h_i \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (15)$$

当 $j = 0$ 时,

$$J_{ij}(x) = 0, R_{ij}(x) = 0. \quad (16)$$

显然 $J_{\lambda(t)}$ 为反对称矩阵, $R_{\lambda(t)}$ 为半正定矩阵,故(14)为系统的耗散 Hamilton 实现.

3 切换励磁控制器设计

基于电力系统切换数学模型的耗散 Hamilton 实现,可以利用各切换子系统的 Hamilton 函数构成多 Lyapunov 函数,并结合系统结构特性设计反馈控制器.具体地,选择切换控制器

$$v = -K g_{\lambda(t)}^T(x) \frac{\partial H(x)}{\partial x} = -K \begin{bmatrix} 2 \frac{c_1}{d_1} x_{1j1} x_{1j3} + \frac{e_1 + h_1 B_{11}}{h_1} x_{1j3} - \sum_{k=1, k \neq 1}^3 B_{1k} x_{kj3} \cos(x_{1j1} - x_{kj1}) \\ 2 \frac{c_2}{d_2} x_{2j1} x_{2j3} + \frac{e_2 + h_2 B_{22}}{h_2} x_{2j3} - \sum_{k=1, k \neq 2}^3 B_{2k} x_{kj3} \cos(x_{2j1} - x_{kj1}) \\ 2 \frac{c_3}{d_3} x_{3j1} x_{3j3} + \frac{e_3 + h_3 B_{33}}{h_3} x_{3j3} - \sum_{k=1, k \neq 3}^3 B_{3k} x_{kj3} \cos(x_{3j1} - x_{kj1}) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

其中: $j = 1, K = \text{diag}\{k_1, k_2, k_3\} > 0$ 为反馈增益

矩阵.考虑到预置状态反馈(7),原系统的励磁控制器为

$$u_i = -\frac{2c_i h_i}{d_i} x_{ij1} x_{ij3} - k_i \left[2 \frac{c_i}{d_i} x_{ij1} x_{ij3} + \frac{e_i + h_i B_{ii}}{h_i} x_{ij3} - \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \cos(x_{ij1} - x_{kj1}) \right]. \quad (18)$$

在上述反馈控制器作用下,闭环系统成为

$$\dot{x} = [J_{\lambda(t)} - (R_{\lambda(t)} + K g_{\lambda(t)} g_{\lambda(t)}^T)] \frac{\partial H(x)}{\partial x}. \quad (19)$$

为分析闭环系统稳定性,首先对切换耗散 Hamilton 系统给出下面一般性结论^[13].

假设 1 对切换耗散 Hamilton 系统(6),如果 $\forall i \neq j \in \Lambda, \forall x, y \in R^n, \Delta H_i = H_i(x) - H_i(y)$ 和 $\Delta H_j = H_j(x) - H_j(y)$ 具有相同符号,即 $\text{sign}(\Delta H_i) = \text{sign}(\Delta H_j)$,所有的 Hamilton 函数具有相同的变化趋势.

引理 1 对切换耗散 Hamilton 系统(6),若假设 1 成立,则系统在任意切换路径 $\lambda(t)$ 下稳定.

若对 $\forall i \in \Lambda, R_i(x) \geq 0$,存在 $l \in \Lambda$ 使得:①第 l 子系统关于 $y_l = R^{\frac{1}{2}}(x)$ 零状态可检测;②

对任意正数 $c > 0$,集合 $D_c^l = \{x \in R^n \mid H_l(x) = c, R^{\frac{1}{2}}(x) \frac{\partial H_l}{\partial x} = 0\}$ 是一有限集,则系统(6)在任意切换路径下渐近稳定.

对电力系统,注意到在控制律(18)作用下,对所有子系统有

$$\begin{aligned} \dot{H}(x) &= \left(\frac{\partial H(x)}{\partial x} \right)^T [J_{\lambda(t)} - (R_{\lambda(t)} + K g_{\lambda(t)} g_{\lambda(t)}^T)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} \\ &= - \left(\frac{\partial H(x)}{\partial x} \right)^T (R_{\lambda(t)} + K g_{\lambda(t)} g_{\lambda(t)}^T) \frac{\partial H(x)}{\partial x} \leq 0. \end{aligned} \quad (20)$$

故所有子系统的 Hamilton 函数都具有相同的变化趋势,满足假设 1,系统在任意切换路径下稳定.

下面以电机全部并网运行时的子系统为例分析系统的渐近稳定性.首先对该子系统,有

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{111} & \dot{x}_{112} & \dot{x}_{113} & \dot{x}_{211} & \dot{x}_{212} & \dot{x}_{213} & \dot{x}_{311} & \dot{x}_{312} & \dot{x}_{313} \end{bmatrix}^T = [J - R] \frac{\partial H}{\partial x} + g u. \quad (21)$$

其中: $J = \text{diag}\{J_{11}, J_{21}, J_{31}\}$; $R = \text{diag}\{R_{11}, R_{21}, R_{31}\}$; $g = \text{diag}\{g_{11}, g_{21}, g_{31}\}$; $u = [u_1, u_2, u_3]^T$.

令 $x_e = (\delta_{1e}, \omega_0, E'_{1qe}, \delta_{2e}, \omega_0, E'_{2qe}, \delta_{3e}, \omega_0, E'_{3qe})^T$ 为系统的平衡点,将系统状态作如下变量

代换 $x = x' + x_e$. 为简便起见,将 x' 仍记为 x .

可以验证子系统关于 $y = R^{\frac{1}{2}}(x) \frac{\partial H}{\partial x}$ 零状态可检测. 实际上,该式可以表示为

$$\begin{cases} x_{ij2} = 0, \\ 2 \frac{c_i}{d_i} (x_{ij1} + \delta_{ie}) (x_{ij3} + E'_{iqe}) + \\ \frac{e_i + h_i B_{ii}}{h_i} (x_{ij3} + E'_{iqe}) - \\ \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} (x_{kj3} + E'_{kqe}) \cos[(x_{ij1} - x_{kj1}) - (\delta_{ke} - \delta_{ie})] = 0. \end{cases} \quad (22)$$

其中 $i = 1, 2, 3, j = 1$.

$$\begin{cases} \dot{x}_{ij1} = 0, \\ \dot{x}_{ij2} = a_i - c_i (x_{ij3} + E'_{iqe})^2 - d_i (x_{ij3} + E'_{iqe}) \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} (x_{kj3} + E'_{kqe}) \sin[(x_{ij1} - x_{kj1}) - (\delta_{ke} - \delta_{ie})], \\ \dot{x}_{ij3} = -\frac{2c_i h_i}{d_i} (x_{ij1} + \delta_{ie}) (x_{ij3} + E'_{iqe}) - (e_i + h_i B_{ii}) (x_{ij3} + E'_{iqe}) + h_i \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} (x_{kj3} + E'_{kqe}) \cos[(x_{ij1} - x_{kj1}) - (\delta_{ke} - \delta_{ie})]. \end{cases} \quad (23)$$

由式(22)和式(23)可得 $x \equiv x_e$, 该子系统零状态可检测. 进一步,对任意 $c > 0$,式(22)和

$$\begin{aligned} H(x) = & -\sum_{i=1}^3 x_{ij3} \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \cos(x_{ij1} - x_{kj1}) + \\ & \sum_{i=1}^3 \left(-\frac{a_i}{b_i} x_{ij1} + \frac{c_i}{d_i} x_{ij1}^2 + \frac{1}{2d_i} x_{ij2}^2 + \right. \\ & \left. \frac{e_i + h_i B_{ii}}{2h_i} x_{ij3}^2 \right) = c. \end{aligned} \quad (24)$$

的解集为有限集,故闭环系统渐近稳定.

4 仿真

为验证笔者所设计的切换控制器的有效性,在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建 IEEE 三机系统进行仿真研究. 发电机的容量分别为 $S_{M1} = 5\,000\text{ MVA}$, $S_{M2} = 1\,000\text{ MVA}$, $S_{M3} = 3\,000\text{ MVA}$. 第 5, 7, 8 节点上的负荷容量分别为 $S_5 = 3\,000\text{ MVA}$, $S_7 = 2\,900\text{ MVA}$, $S_8 = 400\text{ MVA}$. 发电机参数如表 1 所示.

表 1 发电机参数

Tab. 1 Generator parameters

发电机	$x_d/\text{p. u.}$	$x'_d/\text{p. u.}$	$x_q/\text{p. u.}$	M/s	T'_{d0}/s
1	1.305	0.296	0.474	3.7	1.01
2	1.863	0.257	0.578	4.5	1.51
3	1.863	0.257	0.578	4.5	1.51

假设系统在 $t = 0\text{ s}$ 时联网运行,第 3 台电机由于故障在 5 s 时切除. 仿真结果如图 2 和图 3 所示.

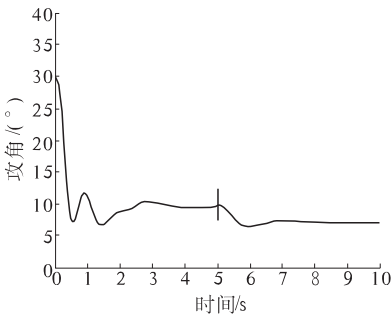


图 2 切机前后功角响应曲线
Fig. 2 Response of the rotor angle

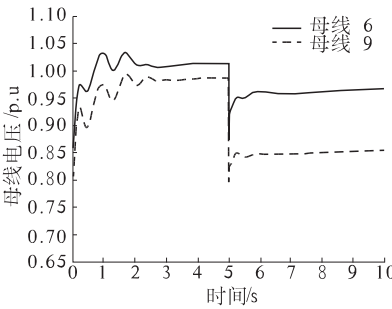


图 3 切机前后母线电压响应曲线
Fig. 3 Responses of the bus voltages

从仿真结果可知,笔者所设计的控制器在电力系统发生切机操作时能有效提高系统的稳定性.

5 结论

研究了 IEEE 三机电力系统发生切机操作时的励磁控制问题. 首先建立了系统的切换非线性系统控制数学模型,通过预置状态反馈完成了系统的耗散 Hamilton 实现,然后基于切换 Hamilton 系统理论设计了状态反馈切换励磁控制器,分析了闭环系统的稳定性. 仿真结果表明笔者所设计的控制器能有效提高系统的暂态稳定性. 笔者所提建模与控制器设计方法可以方便地推广到大型多机系统.

参考文献:

- [1] 薛禹胜. 暂态稳定预防控制和紧急控制的协调[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 1-5.
- [2] DANIEL R V, PAVELLA M. A comprehensive approach to transient stability control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(4): 1446-1460.
- [3] 林舜江, 刘明波, 周欣, 等. 暂态电压安全紧急切负荷控制优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 18-24.
- [4] ZHANG Xue-min, MEI Sheng-wei, WU Sheng-yu. Transient stability and emergency control[J], Science in China, Series E: Technological Science, 2009, 52(2): 420-428.
- [5] 刘凯, 彭志炜, 黄忠, 等. 基于混和逻辑动态模型的混杂电力系统及其电压稳定性分析方法研究[J]. 继电器, 2008, 36(10): 15-18.
- [6] YU Yi-xin, WANG Dong-tao. Dynamic security risk assessment and optimization of power transmission system[J]. Science in China, Series E: Technological Sciences, 2008, 51(6): 713-723.
- [7] PENG J N, SUN Y Z, WANG H F. Co-ordinated emergency control of generator-tripping and SMES based on Hamiltonian system theory[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2005, 27(5-6): 352-360.
- [8] LI X Y. A nonlinear emergency control strategy for HVDC transmission systems[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 67(3): 153-159.
- [9] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 4-20.
- [10] 刘宪林, 杨建, 王明东. 励磁控制系统灰色预测 PID 控制仿真研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2006, 27(2): 70-72.
- [11] 刘艳红, 宋伟华, 王杰. 包含 SVC 和非线性负荷的电力系统耗散实现与控制[J], 控制理论与应用, 2010, 27(1): 47-52.
- [12] WANG Y, CHENG D, LI C, et al. Dissipative Hamiltonian realization and energy-based L_2 disturbance attenuation control of multi-machine power systems[J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 2003, 48(8): 1428-1433.
- [13] ZHU Li-ying, WANG Yu-zhen. Study on the stability of switched dissipative Hamiltonian systems[J]. Science in China, Series F: Information Sciences, 2006, 49(5): 578-591.
- [14] ZHU Li-ying, WANG Yu-zhen. On the modeling and stability analysis of switched two-machine power systems[C]. Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008, Chongqing, China: 7192-7197.

Switched Dynamic Modeling and Excitation Control of Power Systems

LI Jian-yong¹, ZHAO Feng², DING Qing-qing³

(1. School of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The excitation control of power systems under generator tripping emergency measurement is investigated. First, a switched dynamic model for a typical IEEE three-machine multi-area power system is developed. Then, the switched power system is transformed to an equivalent switched dissipative Hamiltonian system via pre-feedback control. A state feedback switching controller is constructed based on the dissipative Hamiltonian realization. Using the Hamiltonian functions of the subsystems as multiple Lyapunov functions, it is shown that the closed-loop system is asymptotically stable under arbitrary switching path. Simulation results demonstrate that the proposed controller can effectively improve the transient stability of the power system.

Key words: power system; switched system; dissipative Hamiltonian realization; excitation control