

基于最优动态闭环控制的水火电互联大电网 自动发电控制策略

翁毅选, 邓长虹, 黄文涛, 舒征宇

(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 研究了含有水电和再热式火电机组的大电网自动发电控制问题。建立了两区域互联的大电网自动发电控制状态空间数学模型。引入新的动态性能指标, 基于最优化控制理论, 提出了最优动态闭环自动发电控制策略。与全状态反馈控制相比较, 该方法既降低了互联系统内部的耦合性, 又能及时了解系统内部的关键状态, 具有更好的实用性和可操作性; 与传统的PI控制策略相比, 提出的方法从全动态的角度出发, 对复杂的水火电互联大电网具有更好的动态适应性。仿真分析验证了理论分析的正确性。

关键词: 互联电力系统; 状态空间模型; 最优动态闭环控制; 自动发电控制; 水电; 火电

中图分类号: TM 734; TM 621; TM 622 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.011

0 引言

现代电网已发展成为多个控制区域构成的复杂互联电力系统, 呈现出结构日益复杂、耦合更加紧密的特点。当电网突然出现一个瞬时的大功率扰动时, 会引起系统频率骤降并迅速波及到全网^[1-3], 给系统的安全稳定构成严重的威胁。在新形势下, 自动发电控制作为互联电力系统功率和频率控制的主要手段^[4-6], 不仅需要维持系统频率和联络线交换功率恒定, 还需要考虑互联系统内部的关键状态和满足系统动态特性的需求。

当前自动发电控制采用的仍然是基于经典控制理论的比例积分(PI)方式^[7], 通过建立互联电力系统自动发电控制的传递函数模型, 引入区域控制误差(ACE), 采用TBC控制模式实现互联电力系统的解耦控制。其主要优点是结构简单、容易实现, 但是其动态调节性能具有明显的缺陷, 如超调量过大、响应时间过长等, 难以适应复杂互联大电网对频率控制的动态特性需求。近年来, 为了改善传统方法的不足, 一些新的智能方法相继被用到了自动发电控制中, 如模糊控制^[8-9]、鲁棒控制^[10-11]以及自适应控制^[12-13]等, 极大改善了系统的动态特性, 但这些方法并没有考虑到系统内部的状态, 对复杂互联电力系统的内部感知能力有限, 具有一定的局限性。

文献[14]将现代控制理论引入到了互联电网自动发电控制中, 建立了互联电力系统自动发电控制的状态空间数学模型, 采用最优控制理论设计控制器, 提高系统的频率控制水平。该方法开辟了采用现代控制理论来研究自动发电控制的先例, 能够全面地反映系统内部状态的动态特性, 但是该方法的最优控制是电力系统的全部状态变量的线性组合, 使控

制系统具有极为复杂的耦合性, 同时针对结构日益复杂的互联电力系统, 并不能实时观测到所有的状态变量, 因此降低了该方法的实用性。文献[15-16]在上述方法的基础上, 通过采用不同的性能指标或对新的控制策略进行改进, 只关注少数重要的状态变量即可, 取得了一定的效果。

本文针对上述问题, 运用现代控制理论, 建立了含有水电和再热式火电机组的互联电网自动发电控制状态空间数学模型, 引入了新的动态性能指标, 采用最优化控制理论, 提出了基于最优动态闭环控制的自动发电控制策略。与全状态反馈控制相比较, 本文方法降低了控制系统内部的耦合性, 减少了对系统内部状态的依赖, 具有更好的实用性和可操作性。同时与经典控制理论方法相比, 本文提出的控制策略对结构日益复杂的互联电力系统具有更好的内部感知能力和动态适应性。通过仿真分析, 将本文方法与全状态反馈控制和经典的PI控制方法进行了比较, 结果表明本文提出的控制策略具有更优异的动态调节特性。

1 互联电力系统自动发电控制数学模型

1.1 传递函数模型

本文建立了一个两区域自动发电控制系统数学模型, 其研究结果可以推广到更多区域互联的电力系统。其中区域1是由再热式火力发电机组组成的火力发电系统, 而在区域2中主要考虑的是常规水电机组。首先建立互联两区域自动发电控制系统的传递函数模型, 如图1所示。

1.2 状态空间模型

根据上述传递函数模型, 选择合理的状态变量和控制变量, 构建互联电网自动发电控制状态空间数学模型, 如式(1)、(2)所示:

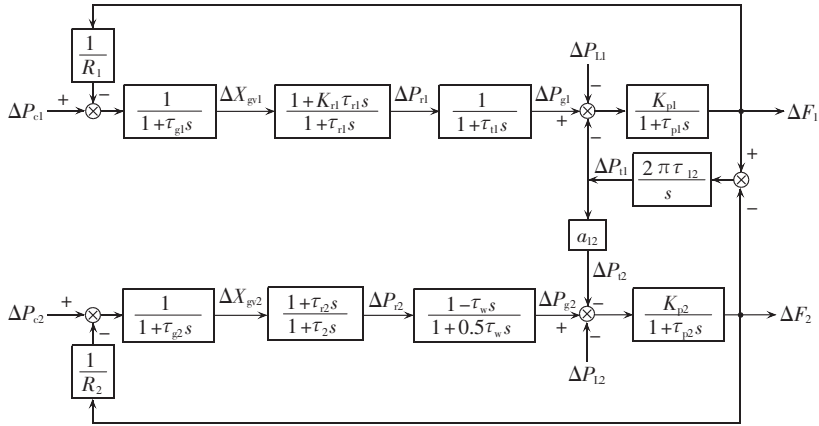


图 1 两区域互联电力系统传递函数模型

Fig.1 Transfer function model of a two-area interconnected power system

$$\dot{X}=AX+BU+FW \quad (1)$$

$$Y=CX \quad (2)$$

其中, X 为状态向量; U 为控制向量; W 为扰动向量; Y 为输出向量; A 、 B 、 C 、 F 分别为系统矩阵、控制矩阵、输出矩阵、扰动矩阵, 并且都是实常数矩阵, 由系统的内部参数和系统结构确定。除了 W 是常值扰动量, 其他向量都是时间 t 的函数, 为了方便, 省略了时间 t 。相关向量定义如下:

$$X^T = [\Delta F_1 \Delta P_{g1} \Delta P_{r1} \Delta X_{gv1} \Delta P_{t1} \Delta F_2 \Delta P_{g2} \Delta P_{r2} \Delta X_{gv2}] \quad (3)$$

$$U^T = [\Delta P_{c1} \Delta P_{c2}] \quad (4)$$

$$Y^T = [\delta_{ACE1} \delta_{ACE2}] \quad (5)$$

$$W^T = [\Delta P_{L1} \Delta P_{L2}] \quad (6)$$

其中, ΔF_i 为控制区频率变化量; ΔP_{gi} 为控制区发电变化量; ΔX_{gv1} 、 ΔP_{r2} 分别为火电机组和水电机组调速器输出变化量; ΔP_{r1} 为火电机组中间再热环节输出变化量; ΔX_{gv2} 为导叶伺服电动机输出变化量; ΔP_{t1} 为联络线功率变化量; ΔP_{ci} 为变频器位置变化量; ΔP_{Li} 为负荷需求变化量; δ_{ACEi} 为区域控制偏差; i 为控制区编号 ($i=1, 2$)。

矩阵 A 、 B 、 F 分别如下:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_{p1}} & \frac{K_{p1}}{\tau_{p1}} & 0 & 0 & -\frac{K_{p1}}{\tau_{p1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\tau_{i1}} & \frac{1}{\tau_{i1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{r1}}{\tau_{g1}R_1} & 0 & -\frac{1}{\tau_{r1}} & \frac{1}{\tau_{r1}} - \frac{K_{r1}}{\tau_{g1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\tau_{g1}R_1} & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_{g1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{p2}}{\tau_{p2}} & -\frac{1}{\tau_{p2}} & \frac{K_{p2}}{\tau_{p2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2\tau_{r2}}{\tau_2\tau_{g2}R_2} & -\frac{2}{\tau_w} 2\left(\frac{1}{\tau_w} + \frac{1}{\tau_2}\right) & -2\left(\frac{1}{\tau_2} - \frac{\tau_{r2}}{\tau_{g2}\tau_2}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\tau_{r2}}{\tau_2\tau_{g2}R_2} & 0 & -\frac{1}{\tau_2} & \frac{1}{\tau_2} - \frac{\tau_{r2}}{\tau_{g2}\tau_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_{g2}R_2} & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_{g2}} \end{bmatrix}$$

$$B^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_{r1}}{\tau_{g1}} & \frac{1}{\tau_{g1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\tau_{r2}}{\tau_{g2}\tau_2} & \frac{\tau_{r2}}{\tau_{g2}\tau_2} & \frac{1}{\tau_{g2}} \end{bmatrix}$$

$$F^T = \begin{bmatrix} -\frac{K_{p1}}{\tau_{p1}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{p2}}{\tau_{p2}} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其中, τ_{gi} 为火电机组调速器时间常数; K_{ri} 为再热系数; τ_{ri} 为再热时间常数; τ_{ti} 为汽容时间常数; K_{pi} 为控

制区域 i 的动力系统增益; τ_{pi} 为控制区域 i 动力系统时间常数; τ_{g2} 、 τ_{r2} 、 τ_2 为水轮机调速器时间常数; τ_w 为水轮机惯性时间常数; T_{12} 为联络线同步系数; R_i 为控制区域 i 的机组调差系数。

根据区域控制偏差定义, 有:

$$\delta_{ACE1} = \Delta P_{t1} + B_1 \Delta F_1 \quad (7)$$

$$\delta_{ACE2} = \Delta P_{t2} + B_2 \Delta F_2 \quad (8)$$

其中, B_1 、 B_2 为电力系统频率偏差系数。

因此根据式(2)、(7)、(8)可以得到输出矩阵为:

$$C = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{12} & B_2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其中, a_{12} 为同步功率系数。

2 最优动态闭环控制

根据最优控制理论,需要对式(1)进行变换,转换成标准的形式,假设系统在阶跃负荷的扰动下,定义新的变量:

$$\bar{X} = X - X_e \quad (9)$$

$$\bar{U} = U - U_e \quad (10)$$

$$\bar{W} = W - W_e \quad (11)$$

$$\bar{Y} = Y - Y_e \quad (12)$$

其中, X_e 、 U_e 、 W_e 分别为 X 、 U 、 W 在稳态时的数值。

因为 $X(0)=0$, 由式(9)可知, $\bar{X}(0)=-X_e$, 根据假设有 $W=W_e$, 因此有:

$$\dot{\bar{X}} = A\bar{X} + B\bar{U} \quad (13)$$

$$\bar{Y} = C\bar{X} \quad (14)$$

$$X_e^T = [0 \quad \Delta P_{gle} \quad \Delta P_{rle} \quad \Delta X_{gvl e} \quad 0 \quad 0 \quad \Delta P_{g2e} \quad \Delta P_{r2e} \quad \Delta X_{gv2e}] \quad (15)$$

对于一个阶跃扰动, 有如下关系式成立:

$$\begin{aligned} \Delta P_{gle} &= \Delta P_{rle} = \Delta X_{gvl e} = \Delta P_{L1} \\ \Delta P_{g2e} &= \Delta P_{r2e} = \Delta X_{gv2e} = \Delta P_{L2} \end{aligned} \quad (16)$$

其中, ΔP_{gle} 、 ΔP_{rle} 、 $\Delta X_{gvl e}$ 、 ΔP_{g2e} 、 ΔP_{r2e} 、 ΔX_{gv2e} 分别为 ΔP_{gl} 、 ΔP_{rl} 、 ΔX_{gv1} 、 ΔP_{g2} 、 ΔP_{r2} 、 ΔX_{gv2} 在稳态时的数值。

建立新的性能指标函数:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (\bar{Y}^T Q_1 \bar{Y} + \bar{U}^T Q_2 \bar{U}) dt \quad (17)$$

将式(14)代入式(17)得到:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (\bar{X}^T C^T Q_1 C \bar{X} + \bar{U}^T Q_2 \bar{U}) dt \quad (18)$$

其中, Q_1 为 $n \times n$ 维半正定加权矩阵; Q_2 为 $r \times r$ 维正定加权矩阵。

在全状态最优反馈控制中, 假设系统的全部状态变量都可以观测到, 那么可以通过全部状态的线性组合来得到最优控制向量:

$$\bar{U}^* = -Q_2^{-1} B^T P \bar{X} = -K \bar{X} \quad (19)$$

$$K = Q_2^{-1} B^T P \quad (20)$$

其中, P 为正定的实对称阵。

但在实际工程中, 并不是所有的状态变量都是能够测取到的, 如果考虑利用输出变量的线性组合形成闭环控制变量 $\bar{U}^*$, 则既容易观测, 也减少了变量数目。因此假设:

$$\bar{U}^* = -K_1 \bar{Y} \quad (21)$$

其中, K_1 为输出反馈矩阵。

由式(5)、(7)、(8)、(12)可知, $\bar{Y}$ 中包含的关键变量为: ΔF_1 、 ΔF_2 、 ΔP_{l1} 和 ΔP_{l2} , 因此由式(21)可得到 $\bar{U}^*$ 是上述 4 个关键变量的线性组合, 与全状态变量反馈控制相比, 减少了所需变量的数目, 降低了两区域互联系统之间的变量信息传递量, 从而可以降低系统内部的耦合强度。

将式(14)代入式(21)有:

$$\bar{U}^* = -K_1 C \bar{X} \quad (22)$$

将式(22)代入式(13)得到动态闭环控制系统的状态方程为:

$$\dot{\bar{X}} = (A - BK_1 C) \bar{X} = \bar{A} \bar{X} \quad (23)$$

$$\bar{A} = A - BK_1 C \quad (24)$$

将式(22)代入式(18), 并整理后有:

$$\begin{aligned} J &= \int_0^\infty (\bar{X}^T C^T Q_1 C \bar{X} + \bar{X}^T C^T K_1^T Q_2 K_1 C \bar{X}) dt = \\ &\int_0^\infty \bar{X}^T C^T (Q_1 + K_1^T Q_2 K_1) C \bar{X} dt = \int_0^\infty \bar{X}^T \bar{Q} \bar{X} dt \end{aligned} \quad (25)$$

$$\bar{Q} = C^T (Q_1 + K_1^T Q_2 K_1) C \quad (26)$$

其中, $\bar{Q}$ 为正定矩阵。

问题转换为确定输出反馈矩阵 K_1 , 使目标函数式(25)取最小值。根据李雅普诺夫第二方法, 首先假定闭环系统状态矩阵 $\bar{A}$ 的特征值全部具有负实部, 闭环系统是渐近稳定的。然后在此基础上利用李雅普诺夫函数与二次型性能指标间的关系确定最优参数。对闭环控制系统构造一个李雅普诺夫函数:

$$V(\bar{X}) = \bar{X}^T P \bar{X} \quad (27)$$

对式(27)两边求导, 并将式(23)代入得到:

$$\dot{V}(\bar{X}) = \bar{X}^T (\bar{A}^T P + P \bar{A}) \bar{X} \quad (28)$$

根据假设, 当 $V(\bar{X})$ 取正定时, $\dot{V}(\bar{X})$ 必为负定。因此, 令:

$$\bar{A}^T P + P \bar{A} = -\bar{Q} \quad (29)$$

由式(27)~(29)可得:

$$\bar{X}^T \bar{Q} \bar{X} = -\frac{d}{dt} (\bar{X}^T P \bar{X}) \quad (30)$$

将式(30)代入式(25)整理, 由于闭环系统是渐近稳定的, $\bar{X}(\infty) \rightarrow 0$, 得到:

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2} \int_0^\infty \bar{X}^T(t) \bar{Q} \bar{X}(t) dt = \\ &-\frac{1}{2} \bar{X}^T(t) P \bar{X}(t) \Big|_0^\infty = \frac{1}{2} \bar{X}^T(0) P \bar{X}(0) \end{aligned} \quad (31)$$

在李雅普诺夫方程式(29)的约束下, 求式(31)的

极小值,因此构造汉密尔顿函数:

$$H(\mathbf{P},\mathbf{K},\boldsymbol{\lambda})=\frac{1}{2}\bar{\mathbf{X}}^T(0)\mathbf{P}\bar{\mathbf{X}}(0)+\boldsymbol{\lambda}^T(\bar{\mathbf{A}}^T\mathbf{P}+\mathbf{P}\bar{\mathbf{A}}+\bar{\mathbf{Q}})=\frac{1}{2}\bar{\mathbf{X}}^T(0)\mathbf{P}\bar{\mathbf{X}}(0)+\boldsymbol{\lambda}^T[(\mathbf{A}-\mathbf{B}\mathbf{K}_1\mathbf{C})^T\mathbf{P}+\mathbf{P}(\mathbf{A}-\mathbf{B}\mathbf{K}_1\mathbf{C})+\mathbf{C}^T\mathbf{K}_1^T\mathbf{Q}_2\mathbf{K}_1\mathbf{C}+\mathbf{C}^T\mathbf{Q}_1\mathbf{C}] \quad (32)$$

其中, $\boldsymbol{\lambda}$ 为 $n \times n$ 维对称矩阵。

由此可求得使式(31)取最小值的必要条件为:

$$\frac{\partial H}{\partial \mathbf{K}}=0 \quad (33)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \mathbf{P}}=0 \quad (34)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \boldsymbol{\lambda}}=0 \quad (35)$$

由式(33)—(35)可以得到:

$$\mathbf{K}_1=\mathbf{Q}_1^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}\boldsymbol{\lambda}\mathbf{C}^T(\mathbf{C}\boldsymbol{\lambda}\mathbf{C}^T)^{-1} \quad (36)$$

$$(\mathbf{A}-\mathbf{B}\mathbf{K}_1\mathbf{C})\boldsymbol{\lambda}+\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{A}-\mathbf{B}\mathbf{K}_1\mathbf{C})^T+\frac{1}{2}\bar{\mathbf{X}}(0)\bar{\mathbf{X}}^T(0)=0 \quad (37)$$

$$\bar{\mathbf{A}}^T\mathbf{P}+\mathbf{P}\bar{\mathbf{A}}+\bar{\mathbf{Q}}=0 \quad (38)$$

3 仿真分析

3.1 矩阵 $\mathbf{Q}_1$ 和 $\mathbf{Q}_2$ 的取值

根据性能指标 J ,为了使系统频率变化量和联络线交互功率偏移量最终保持为零值,从而使区域控制偏差为零,本文选取如下求积公式:

$$\int_0^\infty (\delta_{ACE1}^2+\delta_{ACE2}^2)dt$$

因此根据上式和矩阵 $\mathbf{Q}_1$ 的定义,选择矩阵 $\mathbf{Q}_1$ 为:

$$\mathbf{Q}_1=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

同时为了在动态过程中表示对控制输入的约束,加入了对控制输入的求积公式:

$$\int_0^\infty (u_1^2+u_2^2)dt$$

根据上式选择了矩阵 $\mathbf{Q}_2$ 为:

$$\mathbf{Q}_2=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3.2 自动发电控制系统的仿真研究

本文利用 MATLAB/Simulink 建立了自动发电控制的状态空间数学模型,并建立了基于最优动态闭环控制的控制器,应用到含有水电和再热式火电互联的电力系统自动发电控制中。仿真算法采用了四/五阶龙格库塔法(ode45),并将仿真结果与传统的全状态最优反馈控制和 PI 控制进行比较,具体参数选取如下: $\tau_p=0.08\text{ s}$, $K_{pi}=0.5$, $\tau_{r1}=10\text{ s}$, $\tau_{u1}=0.3\text{ s}$, $K_{pu}=120$,

$\tau_{pv}=20\text{ s}$, $R_i=2.4$, $B_i=0.425$, $\tau_{g2}=48.7\text{ s}$, $\tau_{i2}=5\text{ s}$, $\tau_2=0.513\text{ s}$, $\tau_w=1.0\text{ s}$, $T_{12}=0.0866$;传统的 PI 控制器参数选择为 $K_p=1.5$, $K_i=0.15$ 。分别在区域 1 和 2 的 $t=0\text{ s}$ 时加入一个 1% 的阶跃负荷扰动,1% 的常值干扰发生在火电区域、抽蓄区域的仿真曲线分别如图 2—6、7—11 所示,图中 ΔP_{11} 、 δ_{ACE1} 、 δ_{ACE2} 为标么值。

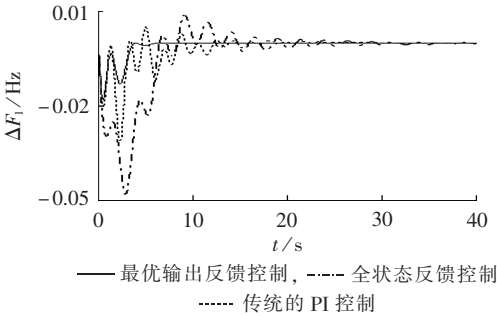


图 2 区域 1 的频率偏移
Fig.2 Frequency deviations of area 1

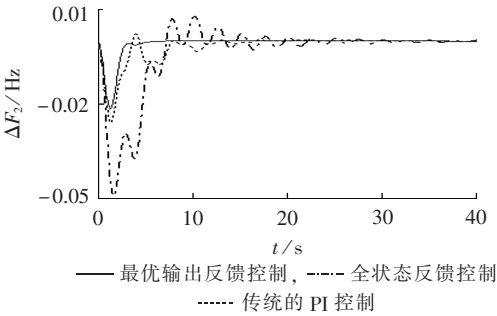


图 3 区域 2 的频率偏移
Fig.3 Frequency deviations of area 2

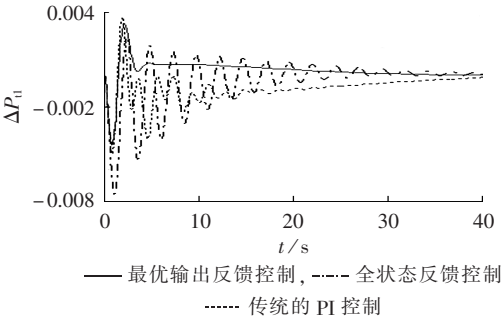


图 4 联络线功率偏移量
Fig.4 Power deviations of tie-line

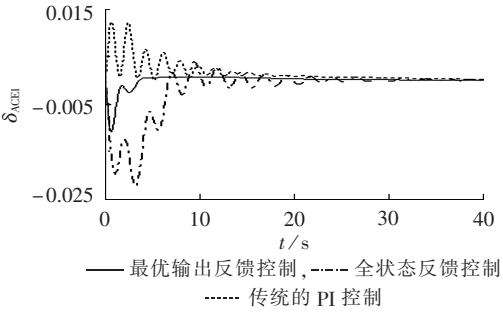


图 5 区域 1 的区域控制偏差
Fig.5 Control error of area 1

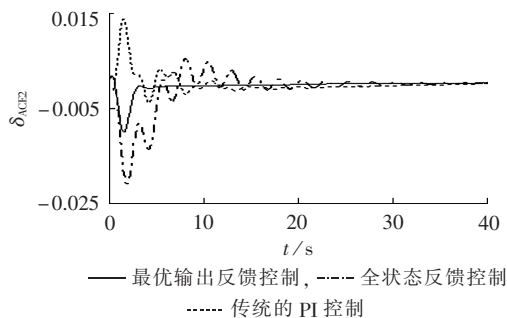


图 6 区域 2 的区域控制偏差

Fig.6 Control error of area 2

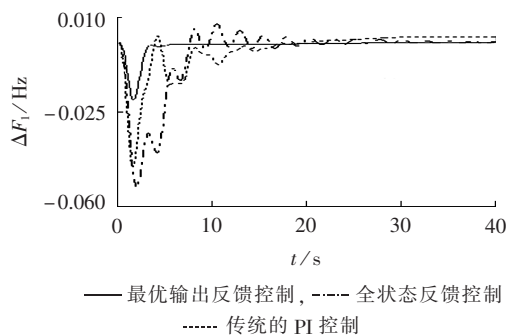


图 7 区域 1 的频率偏移

Fig.7 Frequency deviations of area 1

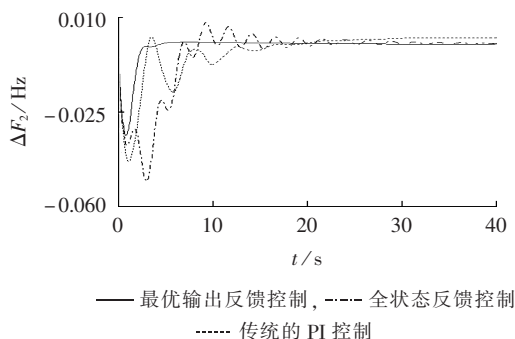


图 8 区域 2 的频率偏移

Fig.8 Frequency deviations of area 2

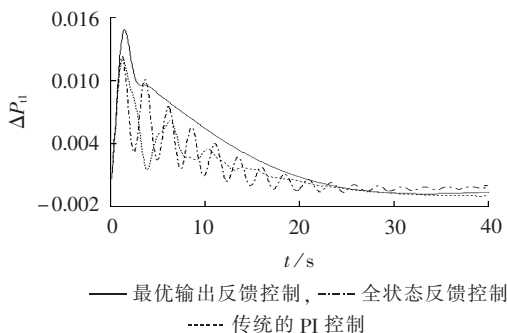


图 9 联络线功率偏移量

Fig.9 Power deviations of tie-line

从图 2—11 可以明显地看到,本文提出的最优输出反馈控制方法较传统的全状态最优反馈控制和 PI 控制策略具有更加优异的控制效果,具体表现在响应更加迅速,调节时间更短,超调量明显减少。

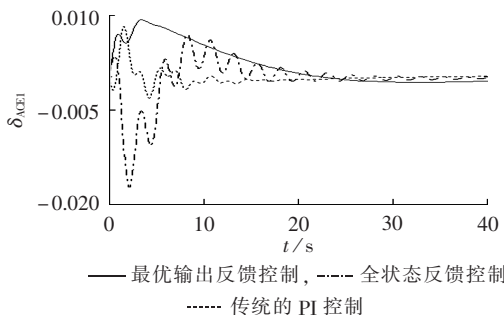


图 10 区域 1 的区域控制偏差

Fig.10 Control error of area 1

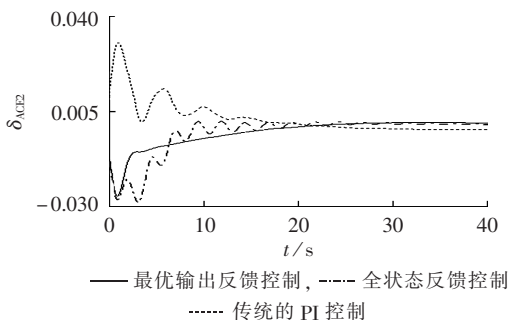


图 11 区域 2 的区域控制偏差

Fig.11 Control error of area 2

4 结语

随着电力系统日益复杂,系统的动态特征变得更加突出,内部的关键状态对提高系统控制性能具有重要的促进作用,本文在研究常规水火互联的大电网自动发电控制问题的基础上,提出了基于最优动态闭环自动发电控制策略,与全状态反馈相比,该控制策略降低了系统的内部耦合强度,同时不失对关键状态变量的感知能力,具有更好的实用性和可操作性。与传统的 PI 控制策略相比,本文提出的方法具有更加优异的动态特性,通过仿真分析,可以看出该策略能够明显地抑制系统的有功功率波动,维持系统的频率和联络线交互功率的恒定。这证明了本文提出的控制策略具有更优异的动态特性和更好的调节性能。

参考文献:

- [1] 朱涛,于继来. 协调联络线与区域电网攀峰的互联电网有功调度[J]. 电力系统自动化,2008,32(1):35-38.
ZHU Tao,YU Jilai. Active dispatch for interconnected power system considering of tie line power schedule and peak climbing demand[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(1): 35-38.
- [2] 刘新东,陈焕远,姚晨. 基于非线性方法抑制特高压联络线功率波动的控制策略仿真[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):92-95.
LIU Xindong,CHEN Huanyuan,YAO Chen. Simulation of power control strategy based on nonlinear method for UHV tieline[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(4):92-95.
- [3] 孙素琴,滕贤亮,戴飞,等. 河南电网 AGC 水火电联调试验研究

- [J]. 电力系统自动化,2008,32(6):99-103.
- SUN Suqin,TENG Xianliang,DAI Fei,et al. Experimental investigation on coordinate control between hydro units and thermal units in Henan Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(6):99-103.
- [4] 邢金峰,何占宾,杨兴宇,等. 自动发电控制在河北南部电网中的应用[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):128-131.
- XING Jinfeng,HE Zhanbin,YANG Xingyu,et al. Application of AGC in Hebei southern power network[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(4):128-131.
- [5] 李红梅,严正. 强化学习方法在水火混杂 AGC 系统中的应用[J]. 电力系统自动化,2010,34(9):39-43.
- LI Hongmei,YAN Zheng. Application of reinforcement learning method in a hydro-thermal hybrid automatic generation control system[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(9):39-43.
- [6] 滕贤亮,高宗和,张小白,等. 有功调度超前控制和在线水火电协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2008,32(22):16-20.
- TENG Xianliang,GAO Zonghe,ZHANG Xiaobai,et al. Look-ahead control for active power dispatching system and online hydro-thermal coordinated control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(22):16-20.
- [7] 孟祥萍,薛昌飞,张化光. 多区域互联电力系统的 PI 滑模负荷频率控制[J]. 中国电机工程学报,2001,21(3):6-11.
- MENG Xiangping,XUE Changfei,ZHANG Huaguang. PI sliding model load frequency control of multi-area power systems [J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(3):6-11.
- [8] 余涛,于文俊,李章文. 基于 CPS 标准的 AGC 变论域模糊松弛控制方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(23):37-41.
- YU Tao,YU Wenjun,LI Zhangwen. Fuzzy control with variable universe and its application to AGC relax control based on CPS [J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(23):37-41.
- [9] INDULKAR C S,RAJ B. Application of fuzzy controller to automatic generation control[J]. Electric Machines and Power systems, 1995,23(2):209-220.
- [10] WANG Y,ZHOU R,WEN C. Robust load-frequency controller design for power systems[J]. IEE Proceedings-Generation,Transmission and Distribution,1993,140(1):11-16.
- [11] LIM K Y,WANG Y,ZHOU R. Robust decentralized load-frequency control of multi-area power systems[J]. IEE Proceedings-Generation,Transmission and Distribution,1996,143(5):337-386.
- [12] TALAQ J,AL-BASRI F. Adaptive fuzzy gain scheduling for load frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999,14(1):145-150.
- [13] YESIL E,GUEZELKAYA M,EKSIN I. Self tuning fuzzy PID type load and frequency controller[J]. Energy Conversion and Management,2004,45(3):337-390.
- [14] PAN C T,LIAW C M. An adaptive controller for power systems load-frequency control[J]. IEEE Trans on Power Systems,1989, 4(1):122-128.
- [15] FOSHA C E,ELGERD O I. The megawatt frequency control problem;a new approach via optimal control theory[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems,1970,89(4):563-577.
- [16] PARMAR K P S,MAJHI S. Automatic generation control of an interconnected hydrothermal power system [C]//2010 Annual IEEE India Conference(INDICON). Kolkata,India:[s.n.], 2010:1-5.

作者简介:

翁毅选(1984-),男,湖北黄冈人,博士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制、新能源接入后大电网自动发电控制(E-mail:Yixuan_Weng@163.com);

邓长虹(1963-),女,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为大电网安全稳定分析及控制、新能源接入及电网智能控制、优化控制理论及电网规划、电力系统建模及数字仿真;

黄文涛(1984-),男,湖北武汉人,博士研究生,主要研究方向为抽水蓄能建模及其在大电网中的应用、电力系统稳定与控制(E-mail:hwthwt1223@163.com)。

AGC based on optimal dynamic closed-loop control for interconnected power grid of hydro and thermal power plants

WENG Yixuan,DENG Changhong,HUANG Wentao,SHU Zhengyu

(College of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China)

Abstract: The AGC(Automatic Generation Control) is researched for the interconnected power grid with hydro and thermal power plants. The AGC state space mathematical model of a two-area power grid is established. A dynamic performance index is introduced and a strategy of optimal dynamic closed-loop AGC based on optimal control theory is proposed. Compared with the full state feedback control,it reduces the internal coupling of the interconnected system and masters timely the critical states within system,resulting in better practicability and maneuverability. Compared with the traditional PI control,it carries out a comprehensively dynamic control,resulting in better dynamic adaptability to complex interconnected power grid. Simulation verifies the correctness of theoretical analysis.

Key words: interconnected power system; state space model; optimal dynamic closed-loop control; automatic generation control; hydroelectric power; thermoelectric power