考虑信息结构约束的多机系统励磁控制协调

杨晓静,赵书强,马燕峰
(华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室,河北 保定 071003)

摘要: 提出了一种考虑信息结构约束时协调设计励磁控制器的新方法。首先基于信息结构的概念,将控制器的设计转化为特定信息结构下的最优控制问题,然后将推广的最小误差激励法用于该问题的求解,从而求出反馈增益矩阵。仿真结果表明,与分散协调励磁控制相比,引入有价值的远方信号所得到的励磁控制策略能够增强阻尼,提高系统稳定性。

关键词: 电力系统; 信息结构; 励磁控制; 最小误差激励法

中图分类号: TM301.2; TM76 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2006)05-0024-05

0 引言

同步发电机励磁控制长期以来一直是电力系统最经济和有效的控制手段之一。现代电力系统是一个统一的,各动态元件、子系统间相互耦合的大系统,它要求控制元件之间能够协调一致地工作,使全系统性能指标达到最优。因此必须重视多机系统中励磁控制器之间的协调问题。

现代电力系统广阔的地域分布和复杂的系统行为使得集中控制无论从经济上还是技术上都难以实现,因此以往乃至目前的电力系统控制领域一直强调分散性[1],即要求各局部控制器只反馈本地可观测量。然而传统的分散控制器只是在简化模型下设计的"孤立"控制器,它们可能由于缺乏协调使系统整体性能恶化;基于大系统理论的最优分散协调控制与前述分散"孤立"控制的区别是它要求在信息受限的情况下协调各局部控制器的控制规律,在一定程度上达到集中控制的目的,因而难度明显增大[2,3]。从便于实现的角度追求控制的分散性是可以理解的,但电力系统的动态问题本质上具有全局性,本地测量信号只能间接地包含一些全局信息,它在提高全局稳定性上必然存在局限性[1],而且分散控制本质上存在一个能否达到整个系统可控性的问题[4]。随着通信和信息处理技术的不断进步,从发展的角度看,分散信息结构在电力系统稳定控制中并不是必须的,因此有必要考虑一种不同于传统分散又有别于完全集中的励磁控制器设计方法,即具有特定信息结构模式[5]的协调型励磁控制策略。文献[4,5]在信息结构概念的基础上,提出了特定信息结构下协调设计励磁控制的方法,但是需求解扩展 Levine - Athans方程组,该方程组的求解过程较复杂,不易收敛。

基于以上讨论,本文突破分散信息结构,在励磁控制中引入有价值的远端信号;基于信息结构的概念将最小误差激励法推广用于求解特定信息结构模式下的最优控制问题,求得各个励磁控制器的参数,从而避免了求解 Levine - Athans方程组的繁琐过程;最后结合一个算例证明了上述方法的有效性。

1 信息结构的概念及相关定理

1.1 基本概念

根据文献[4,5],给出以下概念:

(1) 控制信息结构或信息结构 CIS(Control Information Structure), $S(N,M)$是集合 $S_A(N,M)=\{(i,j),\ i\le N,\ j\le M,\ i,j$为自然数$\}$的子集,它描述了大系统中各子系统间的信息互联模式,$(i,j)\in S$表示存在着信息从子系统 j传递到子系统 i的路径,或者说控制 i可以包含状态或输出 j。$S_A(N,M)$或 S_A称为完全 CIS。对于矩阵 $A\in R^{N\times M}$和 CIS S,如果

$$\begin{cases} a_{i,j}\text{可取任何值},\ (i,j)\in S(N,M) \\ a_{i,j}\equiv 0,\ (i,j)\notin S(N,M) \end{cases}$$

则称 A具有 CIS S,所有具有 CIS S的矩阵形成一个集合,记作 MS。

(2) 如果矩阵 $E_s\in M_s$,且所有非 0元素均为 1,则被称为单位控制信息结构矩阵 UCISM(Unit Control Information Structure Matrix),任何 CIS具有唯一对应的 UCISM。

(3) 对于特定的 CIS S及其 E_s和矩阵 $A\in R^{N\times M}$,将 A中与 E_s对应位置为 0的元素固定为 0,其他值保持不变,得到一个新的矩阵,记作 $(A)_s$,成

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为 A的 S投影运算。

1.2　相关定理

关于矩阵对具有特定信息结构 S的矩阵的求导运算有如下法则[4]:

定理一:对于任意常数矩阵 $A\in R^{M\times N}$和具有信息结构 S的矩阵变量 $K\in R^{N\times M}$,有

$$\frac{\partial tr(AK)}{\partial K}=(A^T)_s$$

成立,其中 $tr(\cdot)$是矩阵的迹运算。

定理二:对于常数矩阵 $A\in R^{N\times N}$、$B\in R^{M\times M}$和具有信息结构 S的矩阵变量 $K\in R^{N\times M}$有

$$\frac{\partial tr(AKBK^T)}{\partial K}=(AKB+A^TKB^T)_s$$

成立,其中 $tr(\cdot)$是矩阵的迹运算。

2　控制问题及求解算法

2.1　特定信息结构约束下的最优控制问题

多机电力系统励磁控制设计使用的线性化状态空间模型为[5]:

$$\begin{aligned}X'&=AX+BU\\Y&=CX\end{aligned}\tag{1}$$

式中:$X(t)\in R^N$, $U(t)\in R^M$, $Y(t)\in R^L$分别为状态向量、控制向量和输出向量;A、B、C为常数矩阵,设初始状态 X_0为非 0随机向量,且数学期望 $E(X_0,X_0^T)=E_0$;显然 E_0是对称正定矩阵。

特定信息结构约束下的最优控制问题为:针对式(1),如何找到一个静态反馈控制规律 $U(t)=-KY(t)$, $(K\in M_s$,即 K为具有特定信息结构 S的反馈增益矩阵),以最小化无时限线性二次型 LQ(Linear Quadratic)性能指标

$$J=\int_0^\infty(X^TQX+U^TRU)\,dt\tag{2}$$

的期望值 $\tilde{J}=E(J)$,其中,Q、R为相应维数的对称半正定矩阵。

文[4,5]在信息结构概念的基础上,推导出特定信息结构下最优控制问题有解的必要条件,即扩展 Levine-Athans方程组,并应用适于求解该方程组的直接迭代算法求出反馈增益矩阵。考虑到 Levine-Athans方程组的求解过程较复杂且不易收敛,本文将最小误差激励法推广用于求解特定信息结构下的最优控制问题。

2.2　最小误差激励法求解反馈增益矩阵

对于一个被控系统,若已求得全状态反馈最优控制,由于状态变量的测量问题或者其他原因,需要采用不完全状态反馈或者输出反馈进行简化时,可使用最小误差激励法[6]。对于传统的最小误差激励法,当控制向量 U中的不同分量 U_i需要用不同的输出量 Y_i线性表示时,需要列出多个输出方程 $Y_i=C_iX$,并按照最小误差激励法反复求解。为此本文在信息结构概念的基础上推导了特定信息结构下最小误差激励法的求解公式,采用这种方法可以针对上述情况在统一的输出方程下一次求出所有控制分量的表达式。

设有最优控制系统

$$X'(t)=(A-BK^*)X^*(t)\tag{3}$$

其中:$X^*(t)$为最优控制 $U^*=-K^*X^*$下的状态向量;K^*为最优控制反馈增益矩阵。

令

$$\Delta(t)=Z(t)-X^*(t)\tag{4}$$

$$e(t)=(K^*-KC)X^*(t)\tag{5}$$

式中:$Z(t)$为输出反馈控制 $U(t)=-KY(t)$, $(K\in M_s)$下的状态向量。

最小误差激励法旨在使输出反馈控制的效果尽量逼近全状态反馈最优控制。根据文献[6],求 K的问题可转化为在式(6)的约束下使下列性能指标为最小,

$$J=\frac{1}{2}\int_0^\infty e^T(t)Re(t)\,dt=J_{min}\tag{6}$$

上述性能指标又可以进一步简化为 $J=tr(P)$,其中 P满足:

$$(A-BK^*)^TP+P(A-BK^*)+(K^*-KC)^T\cdot(K^*-KC)=0\tag{7}$$

采用拉格朗日乘子法求解这个条件极值问题,令式(7)为 $G(P,K)=0$,作拉格朗日函数

$$L=tr(P)+tr(V^TG)\tag{8}$$

式中:V是由拉格朗日乘子 $v_{ij}(i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,n)$所组成的矩阵。

式(8)取极值的必要条件为:

$$\frac{\partial L}{\partial P}=0\tag{9}$$

$$\frac{\partial L}{\partial K}=0\tag{10}$$

$$\frac{\partial L}{\partial V}=0\tag{11}$$

式(9)和式(11)的推导与文献[6]相同,下面利用定理一和定理二、采用类似于文[6]的方法推导式(10)。

$$L=tr(P)+tr\{V^T\cdot[A^TP-(K^*)^TB^TP+PA-PBK^*+(K^*)^TK^*-(K^*)^TKC-C^TK^TK^*+$$

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$C^T K^T KC]\} \tag{12}$$

$$\frac{\partial L}{\partial K} = \frac{\partial}{\partial K} tr[-V^T (K^*)^T KC] + \frac{\partial}{\partial K} tr(-V^T \cdot C^T K^T K^*) + \frac{\partial}{\partial K} tr(V^T C^T K^T KC) = 0 \tag{13}$$

$$\frac{\partial}{\partial K} tr[-V^T (K^*)^T KC] = \frac{\partial}{\partial K} tr[-CV^T (K^*)^T K] = -(K^* VC^T)_s \tag{14}$$

$$\frac{\partial}{\partial K} tr[-V^T C^T K^T K^*] = \frac{\partial}{\partial K} tr[-K^* V^T C^T K^T] = -(K^* VC^T)_s \tag{15}$$

$$\frac{\partial}{\partial K} tr[V^T C^T K^T KC] = \frac{\partial}{\partial K} tr[KCV^T C^T K^T] = 2(KCVC^T)_s \tag{16}$$

由以上四式可得:

$$(KCVC^T)_s = (K^* VC^T)_s \tag{17}$$

所以,由(8)、(9)、(10)可得

$$I + (A - BK^*)V + V(A - BK^*)^T = 0 \tag{18}$$

$$(KCVC^T)_s = (K^* VC^T)_s \tag{19}$$

$$(A - BK^*)^T P + P(A - BK^*) + (K^* - KC)^T (K^* - KC) = 0 \tag{20}$$

由以上方程组所求出的 K即为特定信息结构下最优控制问题的反馈增益矩阵。

综上所述,可将求 K的步骤归纳如下:

第一步:列写设计控制器所需的状态空间方程及输出方程,在给定 Q、R的情况下求出全状态变量反馈线性最优控制增益矩阵 K^*。

第二步:采用直接展开法[2]解式(18)所示的李亚普诺夫方程,求出拉格朗日乘子矩阵 V。

第三步:根据文[7]的方法由(19)求出 K。

如果想计算式(6)所示的性能指标,则需由式(20)解出 P,从而得出 $J = tr(P)$。

3 算例分析

以一四机两区域系统为例,电网结构如图 1所示,图中标出了一种典型工况下的潮流,其参数见文献[8]。

系统在运行点附近的线性化模型如式(1),其中 $X = [\Delta\delta_1, \Delta\omega_1, \Delta E'_{q1}, \cdots, \Delta\delta_4, \Delta\omega_4, \Delta E'_{q4}]^T$,控制各机组的励磁电压 $U = [\Delta U_{f1}, \cdots, \Delta U_{f4}]$,取 C为单位阵,即采用状态反馈,A、B为相应维数的矩阵,具体数值在此不列出。取 $R = \mathrm{diag}[1, 1, 1, 1]$, $Q = \mathrm{diag}[3000, 100\omega_0^2, 5000]$,考虑以下三种典型的信息结构。

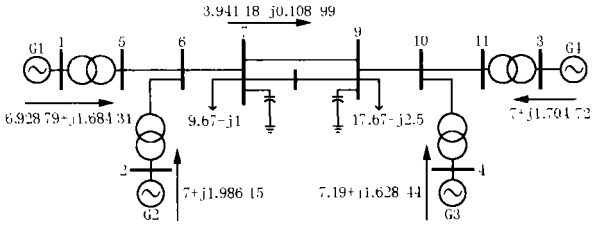

图 1 四机两区域系统

Fig 1 A two-area four-machine power system

方案一:全信息结构约束,相应的 UCISM为:

$$E_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

此时得到的控制方案实际上是全状态反馈的集中式最优控制,虽然在实际应用中这种控制方案难以实现,但可以作为比较控制性能的基础。

方案二:分散信息结构,相应的 UCISM为:

$$E_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

此信息结构表示仅采用本地状态量进行反馈控制。

方案三:特定信息结构,相应的 UCISM为:

$$E_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

这种信息结构约束表示任一机组的功角偏差可以为所有局部控制所利用(由于光纤、卫星通信技术和 GPS同步时钟的应用,这一点完全可以做到)。

按照前述理论和算法,分别在上述三种 CIS约束下设计协调型励磁控制规律,所得的控制器参数见附录。表 1比较了三种方案下的目标函数值和机电模式特征值。其中目标函数值如式(6)所示,由 $J = tr(P)$计算,其大小代表了与全状态反馈的集中式最优控制效果的差别。

由表 1可见,与分散信息结构相比,特定信息结构下的励磁控制由于引入了远方信号,能够增强机电模式特征值的阻尼比并使系统的阻尼裕度更充足;而目标函数的大小则说明后者的效果更接近于全状态反馈的集中型最优控制。

为了验证上述结论,在 Matlab6.5环境中进行了仿真,结果如图 2、3、4所示。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　三种控制方案的比较

Tab. 1　Comparison of the three schemes

	方案一	方案二	方案三
目标函数	$8.285\,5\times10^{-14}$	$2.459\,1\times10^{6}$	$9.913\,4\times10^{5}$
机电模式	-3.568 3 ±6.145 i -2.953 9 ±7.362 1 i -3.468 3 ±7.533 i	-2.908 4 ±7.038 2 i -2.661 5 ±7.929 3 i -2.999 1 ±8.066 8 i	-3.588 6 ±6.994 2 i -2.905 9 ±7.494 2 i -2.788 7 ±7.503 9 i
阻尼比	0.502 0.372 0.418	0.382 0.318 0.349	0.457 0.362 0.349

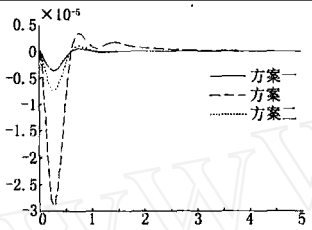

图 2　1、4号机间相对功角的冲激响应曲线

Fig 2　Impulse response curve of relative power-angle between generator 1 and 4

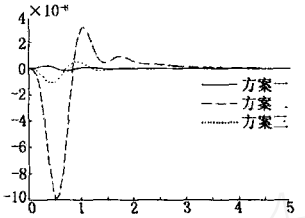

图 3　2、4号机间相对功角的冲激响应曲线

Fig 3　Impulse response curve of relative power-angle between generator 2 and 4

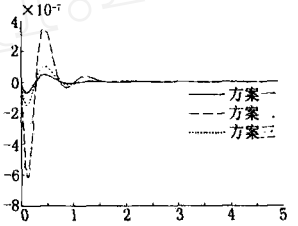

图 4　1、4号机间相对转速的冲激响应曲线

Fig 4　Impulse response curve of speed difference between generator 1 and 4

4　结论

本文在信息结构概念的基础上提出了一种考虑信息结构约束时协调设计励磁控制器的方法。结果表明,信息结构的选择对于控制效果有着重要的影响。集中控制效果最好但是往往难以实现;分散励磁控制只通过本地量间接包含全局信息,因此在提高全系统稳定性上有一定的局限性;在分散信息结构基础上加入一些有价值的远方信号,构成不同于完全分散或集中的特定信息结构,并基于此信息结构采用推广的最小误差激励法所设计的协调型励磁控制策略,可以弥补分散励磁控制的不足,改善控制性能,提高系统稳定性。

附录:　控制器参数

下面列出三种信息结构下求得的反馈增益矩阵。

全信息结构下:

$$\begin{bmatrix} -90.39 & -11\,857 & 108.19 & -67.85 & -1\,405.7 & 27.42 & -6.08 & 373.76 & 4.92 & -4.34 & -0.46 & 12.96 \\ -90.32 & -2\,784.1 & 17.048 & -57.22 & -12\,106 & 148.58 & -10.45 & 582.12 & 6.41 & -9.74 & 20.14 & 18.24 \\ -19.96 & -272.96 & 5.010\,6 & -24.13 & -584.38 & 11.81 & -94.21 & -11\,376 & 114.28 & -59.20 & -2\,071.2 & 44.73 \\ -25.14 & -297.39 & 5.221\,4 & -32.22 & -648.62 & 13.41 & -86.35 & -2\,034.1 & 19.21 & -12.53 & -11\,392 & 188 \end{bmatrix}$$

特定信息结构下:

$$\begin{bmatrix} -35.30 & -5\,690.3 & 51.435 & -21.62 & 0 & 0 & 1.79 & 0 & 0 & 0.97 & 0 & 0 \\ -53.23 & 0 & 0 & -40.36 & -9\,468 & 121.89 & 2.93 & 0 & 0 & -0.53 & 0 & 0 \\ -1.27 & 0 & 0 & -2.08 & 0 & 0 & -18.09 & -2\,761.5 & 26.83 & -10.12 & 0 & 0 \\ -10.52 & 0 & 0 & -17.11 & 0 & 0 & -59.83 & 0 & 0 & -3.88 & -10\,945 & 179.5 \end{bmatrix}$$

分散信息结构下:

$$\begin{bmatrix} -8.396\,1 & -1\,525.6 & 13.70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -19.65 & -6\,611.5 & 84.81 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.52 & -701.5 & 6.50 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5.40 & -8\,048 & 136.22 \end{bmatrix}$$

参考文献:

[1]　常乃超,兰洲,甘德强,等.广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J].电网技术,2005,29(10):46-50.
CHANG Nai-chao, LAN Zhou, GAN De-qiang, et al. A Survey on Applications of Wide-area Measurements System in Power System Analysis and Control[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 46-

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

50.

[2] 韩英铎,王仲鸿,陈淮金. 电力系统最优分散协调控制[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.
HAN Ying-duo, WANG Zhong-hong, CHEN Huai-jin. Optimal Dispersal and Coordinated Control of Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.

[3] 张凯锋,戴先中. 电力系统分散控制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19): 86-90.
ZHANG Kai-feng, DAI Xian-zhong. Decentralized Control in Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 86-90.

[4] 谢小荣,崔文进,唐义良,等. 大型电力系统特定信息结构下的最优控制[J]. 清华大学学报, 2000, 40(7): 20-23.
XIE Xiao-rong, CUI Wen-jin, TANG Yi-liang, et al. Optimal Control Under a Given Information Structure for Large-scale Power Systems[J]. Journal of Tsinghua University, 2000, 40(7): 20-23.

[5] 谢小荣,夏祖华,崔文进,等. 考虑信息结构约束的协调型非线性优化励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 1-5.
XIE Xiao-rong, XIA Zu-hua, CUI Wen-jin, et al. Coordinated Nonlinear Optimal Excitation Control with Information Structure Constraint[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 1-5.

[6] 卢强,王仲鸿,韩英铎. 输电系统最优控制[M]. 北京:科学出版社, 1984.
LU Qiang, WANG Zhong-hong, HAN Ying-duo. Optimal Control of Power Transmission System[M]. Beijing: Science Press, 1984.

[7] 谢小荣,崔文进,唐义良,等. 求解扩展 Levine-Athans 方程组的直接迭代算法[J]. 清华大学学报, 2001, 41(3): 1-4.
XIE Xiao-rong, CUI Wen-jin, TANG Yi-liang, et al. Direct Iterative Algorithm to Solve the Extended Levine-Athans Equations[J]. Journal of Tsinghua University, 2001, 41(3): 1-4.

[8] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. McGraw-Hill, 1994.

收稿日期: 2005-07-06; **修回日期**: 2005-07-29

作者简介:

杨晓静 (1980-),女,硕士,研究方向为电力系统运行、分析与控制; E-mail: yangxiaojing0601@163.com

赵书强 (1964-),男,博士,教授,研究方向为电力系统稳定分析与控制,电力系统谐波分析;

马燕峰 (1978-),女,硕士,助教,研究方向为电力系统运行、分析与控制。

Coordination of excitation control with information structure constraint in multi-machine power system

YANG Xiao-jing, ZHAO Shu-qiang, MA Yan-feng

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: This paper proposes a new approach to coordinated design of excitation controller under information structure constraint. Based on the concept of control information structure, design of the excitation controller is formulated into the optimal control problem with a given information structure. Then the method of minimum erratum excitation is extended to solve this problem and find the feedback gain matrix. Simulation results show that the resulted excitation control scheme which adds valuable remote signals to decentralized information structure have advantage over decentralized coordinated excitation control in improving oscillation damping ability and system stability.

Key words: power system; information structure; excitation control; method of minimum erratum excitation

(上接第 4页 continued from page 4)

卢锦玲 (1971-),女,副教授,博士研究生,研究方向为人工智能在电力系统中的应用;

卢 敏 (1980-),女,硕士,从事电力系统调度自动化系统的开发和维护工作。

Multi-agent based real-time intelligent system for power systems fault diagnosis

ZHU Yong-li[1], LU Jin-ling[1], LU Min[2], WANG Ping[1]

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Zhejiang Power Dispatching and Communication Center, Hangzhou 310007, China)

Abstract: A real-time fault diagnosing system on power systems can assist dispatchers to recognize faulty elements, shorten the time of dealing with a blackout accident and avoid its enlarging. A new multi-agent based approach and systematic structure of real-time fault diagnosis on a power system are proposed in the paper, multithreading techniques are used in the design of the corresponding Agents of the proposed system. The mixed programming of PROLOG and JAVA is adopted to implement the system. Experiments on the developed prototype proposed system show that the new approach for fault diagnosis is feasible. It can improve the reactiveness of the system to blackout incidents in a power system, and give up the present diagnosing objective when its environment changes largely.

Key words: multi-agent systems; electric power systems; real-time fault diagnosis; artificial intelligence

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net