

基于 MAS 的多判据分层电压紧急控制系统

李来福^{1,2},王芝茗³,于继来¹,柳 焯¹

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 江苏省电力公司,江苏 南京 210024;

3. 辽宁电力调度通信中心,辽宁 沈阳 110006)

摘要: 针对单一类型判据判断和单层监测电压稳定性的局限性,提出了基于多智能体系统(MAS)的区域电网多判据分层电压紧急控制系统。给出了系统结构、各层 Agent 电压紧急态势判据原理、多判据综合决策方法和流程,以及电压紧急情况下各层 Agent 的协同控制机制。分层的结构有利于各层 Agent 发挥独立自治的作用,又可以通过各层 Agent 之间的协作,发挥系统的整体效应。多判据综合判断电压态势的紧急程度,有助于准确观察电压态势,以便及时采取针对性的措施,确保系统的稳定运行。以 IEEE 30 节点系统为基础的仿真算例表明,所提方法能够较好地满足电压态势紧急情况下的监测与控制,具有较高的实时性、自适应性和准确性,适合于在线监测和控制电压紧急态势。

关键词: 电力系统; 多判据决策; 电压紧急分层控制; 多智能体系统

中图分类号: TM 761⁺.1; TM 714.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)05-0005-06

0 引言

电力市场开放下的电网安全问题,美加、意大利大停电事故引起人们的极大关注^[1-4]。电压安全稳定监视研究和应用的焦点^[5-9],一般是单层的,或集中在系统端,或集中在就地枢纽节点端,而且其电压安全稳定判据多为单一类型判据^[10],一般表现为单一的状态指标或裕度指标。然而引起电压不安全问题原因是多方面的,而且其危急程度也是在逐级变化的^[11-14]。因此,研究电压紧急情况下多判据分层综合决策和协调控制,就显得特别重要。

多智能体系统 MAS(Multi-Agent System)中各个 Agent 具有自治和协作能力,单一 Agent 可以独立完成设定的任务,还可以与其他 Agent 协作完成给定的任务^[15-16]。近期,MAS 理论被引入电力系统电压无功优化调节和紧急控制领域^[17-19]。本文根据区域电网的特点和电压无功运行控制的要求,提出了基于 MAS 的区域电网多判据分层电压紧急控制系统,给出了系统结构、各层 Agent 电压紧急态势判据、多判据综合决策方法和流程,以及电压紧急情况下各层 Agent 的协同控制机制。算例表明,本文的方法能够较好地满足电压态势紧急情况下的监测与控制,具有较高的实时性、自适应性和准确性,适合于在线监测和控制电压紧急态势。

1 控制系统结构

基于混合型结构 MAS 的多判据分层电压紧急

控制系统,如图 1 所示。其结构分散与集中相协调,和区域电网的物理特点相吻合。

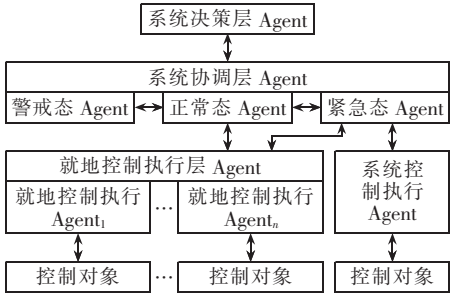


图 1 基于 MAS 的多级分层电压紧急控制系统结构

Fig.1 Structure of hierarchical voltage emergency control system based on multi-agent system

下面介绍各层 Agent 之间的协同机制。

1.1 系统决策层 Agent

系统决策层 Agent 采集全局信息,监测与判断区域电网运行态势,根据综合决策结果,按电压态势的不同,分别将任务分解给系统协调层 Agent,包括正常态、警戒态和紧急态 Agent。正常态 Agent 按优化方式,实时将优化的整定值发送给就地控制执行层 Agent,并监测命令的执行情况和效果。警戒态 Agent 一方面将警戒信息反馈给系统决策层 Agent,促使调度运行人员提高警觉,并进一步判断电压态势是否可能进入紧急状态,同时通知正常态 Agent,重新进行优化计算。紧急态 Agent 则根据电压态势紧急程度分别作出不同的紧急控制决策,协调系统内的可调控资源,并将命令发送给就地控制执行层 Agent 或系统控制执行 Agent。在系统特别紧急的状态下,紧急减载则不失为一种有效控制措施,它通过牺牲部分负荷以保证电压的恢复,保持系统的稳定

运行。但减载的数量与何时、何地、减何种负荷则需按当时的状态而定。可以利用的减载措施也是多种多样的,如:通过就地控制执行层 Agent 启动各枢纽节点的就地低频或低压减载;通过系统控制执行 Agent 启动负荷管理系统(LMS),以及基于会话发起协议(SIP)和 Webit 技术的居民端控制设备等^[13]。系统控制执行 Agent,仅在电压态势特别紧急时启动。

1.2 就地控制执行层 Agent

就地控制执行层 Agent 由分布在系统中各枢纽节点的就地控制执行 Agent 组成,根据当地电压态势,就地自治动态完成相应的任务,同时执行系统协调层 Agent 的调控命令,在电压正常态势下和紧急态势下分别采用不同的控制策略。一旦就地控制执行层 Agent 进入紧急状态,应直接启动站端紧急减载,若仍满足不了要求,则反馈给系统协调层紧急态 Agent,由其调动系统内其他可调控资源,予以支持。

1.3 各 Agent 通信

各 Agent 之间通过通信联系,自动协商实现系统的整体控制目标。采用基于消息的机制与点到点的方式,实现各 Agent 之间的信息交换和协同工作。

2 系统层多判据电压紧急态势决策方法

设 $Y_1 \sim Y_4$ 为电压态势一级预估判据, $Y'_1 \sim Y'_4$ 为电压态势二级预估判据。

2.1 电压态势预估判据

2.1.1 阻抗模相对裕度判据

$$Y_1 = \begin{cases} 1 & \text{if } \gamma_A \leq \theta_A \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

$$Y'_1 = \begin{cases} 1 & \text{if } \gamma_A \leq \theta'_A \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

$$\gamma_A = \min\{\gamma_j\}$$

式中 $j \in J, J$ 为区域电网枢纽节点集合; $\gamma = (z_L - z_{Thev}) \div z_L$, 为枢纽节点阻抗模相对裕度, γ_A 为所有枢纽节点 γ 值最小者; z_L, z_{Thev} 分别为枢纽节点负荷阻抗模和区域电网戴维南等值阻抗模; θ_A 为预估枢纽节点 $P - z_{Thev}$ 曲线开始出现斜率密集陡增的转折点的 γ 值, 是电压态势“十分紧张”的门槛; θ'_A 的取值比 θ_A 的取值略微宽松, 是电压态势“比较紧张”的门槛。

2.1.2 $P-U$ 曲线斜率态势预估判据

$$Y_2 = \begin{cases} 1 & \text{if } \eta_B \leq \theta_B \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

$$Y'_2 = \begin{cases} 1 & \text{if } \eta_B \leq \theta'_B \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

$$\eta_B = \min\{\eta_j\}$$

式中 $j \in J, J$ 为区域电网枢纽节点集合; $\eta = \Delta U / \Delta P$ 为枢纽节点 $P-U$ 曲线预估斜率, η_B 为所有枢纽节点 $P-U$ 曲线预估斜率最陡值; θ_B 为预估

枢纽节点 $P-U$ 曲线转折点的 η 值, 是电压态势“十分紧张”的门槛; θ'_B 的取值比 θ_B 的取值略微宽松, 是电压态势“比较紧张”的门槛。

2.1.3 负荷高位快速攀升预估判据

$$Y_3 = \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_F \geq \lambda_H \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

$$Y'_3 = \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_F \geq \lambda'_H \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

式中 $\lambda = \Delta P / \Delta t$, 为区域电网总负荷攀升率; λ_F, λ_H 分别为区域电网总负荷攀升率预估值与历史记录最大值; λ'_H 的取值比 λ_H 的取值略微宽松。

2.1.4 天气温度变化预估判据

$$Y_4 = \begin{cases} 1 & \text{if } T_F \geq T_H \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

$$Y'_4 = \begin{cases} 1 & \text{if } T_F \geq T'_H \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

式中 T_F, T_H 分别为地区天气温度预估值与历史记录最大值; T'_H 的取值比 T_H 的取值略微宽松。

2.2 电压态势实时判据

以下 $R_1 \sim R_6$ 为电压态势一级实时判据, $R'_1 \sim R'_3$ 以及 $R'_5 \sim R'_6$ 为电压态势二级实时判据。

2.2.1 $P-U$ 曲线斜率态势实时判据

$$R_1 = \begin{cases} 1 & \text{if } \mu_B \leq k_B \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

$$R'_1 = \begin{cases} 1 & \text{if } \mu_B \leq k'_B \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

$$\mu_B = \min\{\mu_j\} \quad (8)$$

式中 $j \in J, J$ 为区域电网枢纽节点集合; $\mu = \Delta U / \Delta P$ 为枢纽节点 $P-U$ 曲线实时斜率, μ_B 为所有枢纽节点 $P-U$ 曲线实时斜率最陡值; k_B 为枢纽节点 $P-U$ 曲线转折点的 μ 值, 是电压态势“十分紧张”的门槛; k'_B 的取值比 k_B 的取值略微宽松, 是电压态势“比较紧张”的门槛。

2.2.2 负荷高位快速攀升实时判据

$$R_2 = \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_R \geq \lambda_H \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

$$R'_2 = \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_R \geq \lambda'_H \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

式中 $\lambda = \Delta P / \Delta t$, 为区域电网总负荷攀升率; λ_R, λ_H 分别为区域电网总负荷攀升率实时值与历史记录最大值; λ'_H 的取值比 λ_H 的取值略微宽松。

2.2.3 天气温度变化实时判据

$$R_3 = \begin{cases} 1 & \text{if } T_R \geq T_H \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

$$R'_3 = \begin{cases} 1 & \text{if } T_R \geq T'_H \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

式中 T_R, T_H 分别为地区天气温度实时值与历史记录最大值; T'_H 的取值比 T_H 的取值略微宽松。

2.2.4 异常事件实时判据

异常事件发生在重要联络线或大机组退出的实时判据:

$$R_4 = \begin{cases} 1 & \text{if } \exists L_i = 1 \cup \exists F_j = 1 \\ & L_i \in L, F_j \in F \\ & i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} L = \{L_1 \cup L_2 \cup L_3 \cup \dots \cup L_N\} \\ F = \{F_1 \cup F_2 \cup F_3 \cup \dots \cup F_M\} \end{cases} \quad (12)$$

式中 L, F 分别为重要联络线与大机组的集合; N, M 分别为重要联络线与大机组的总数。

2.2.5 低压减载电压限值实时判据

$$R_5 = \begin{cases} 1 & \text{if } U_c \leq \theta_c \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

$$R'_5 = \begin{cases} 1 & \text{if } U_c \leq \theta'_c \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$
$$U_c = \min\{U_j\}$$

式中 $j \in J, J$ 为区域电网枢纽节点集合; U_c 为所有枢纽节点电压最小值; θ_c 为常规低压减载电压限值; θ'_c 的取值比 θ_c 的取值略微宽松。

2.2.6 低频减载限值实时判据

$$R_6 = \begin{cases} 1 & \text{if } |\Delta f| \geq \tau_D \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$
$$R'_6 = \begin{cases} 1 & \text{if } |\Delta f| \geq \tau'_D \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

式中 Δf 为额定频率与实时频率之差; τ_D 为常规低频减载频率限值; τ'_D 的取值比 τ_D 的取值略微宽松。

2.3 系统协调层紧急决策

通过 2.1.1~2.1.4 电压态势预估判据和 2.2.1~2.2.6 电压态势实时判据的有机组合, 形成紧急态 Agent 电压紧急态势程度决策表, 将电压态势紧急程度分为 7 个等级, 其紧急程度从 I~VII 递减, 见表 1。

表 1 紧急态 Agent 紧急态势程度决策表

Tab.1 The decision making of emergency status agent

序号	紧急判据组合	紧急级别
1	R_i, R'_j 均为 1, $i=1, 2, \dots, 6; j=1, 2, 3, 5, 6$	I 级
2	R_2, R_3, R_4 同时为 1	II 级
3	R_2, R_4 同时为 1	III 级
4	R_2, R_3 同时为 1	IV 级
5	R_2, R_1 或 R_2, Y_1 同时为 1	V 级
6	任何 R_i 为 1, $i=1, 2, \dots, 6$	VI 级
7	任何 R'_j 为 1, $j=1, 2, 3, 5, 6$ 且任何 Y_k 或 Y'_k 为 1, $k=1$	VII 级

2.4 系统决策层 Agent 综合决策算法

2.4.1 系统警戒状态判定

原则: 如果任何 1 个一级预估判据为 1, 或任何 2 个二级预估判据为 1, 则系统进入警戒状态。

$$W_s = \begin{cases} 1 & \text{if } \exists Y_k = 1, Y_k \in Y \\ & \text{or } \exists Y'_i = 1 \cap \exists Y'_j = 1 \\ & Y_k \in Y; Y'_i, Y'_j \in Y', i \neq j \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (16)$$

式中 $Y = \{Y_1 \cup Y_2 \cup Y_3 \cup Y_4\}$, 为一级预估判据集合; $Y' = \{Y'_1 \cup Y'_2 \cup Y'_3 \cup Y'_4\}$, 为二级预估判据集合; $k, i, j = 1, 2, 3, 4$ 。

2.4.2 系统紧急状态实时判定

原则: 如果任何 1 个一级实时判据为 1, 或 1 个二级实时判据为 1, 且同时 1 个一级或二级预估判据为 1, 则系统进入紧急状态。

$$E_s = \begin{cases} 1 & \text{if } \exists R_l = 1, R_l \in R \\ & \text{or } \exists R'_k = 1 \cap \{\exists Y_i = 1 \cup \exists Y'_j = 1\} \\ & R'_k \in R', Y_i \in Y, Y'_j \in Y' \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

式中 $R = \{R_1 \cup R_2 \cup R_3 \cup R_4 \cup R_5 \cup R_6\}$, 为一级实时判据集合; $R' = \{R'_1 \cup R'_2 \cup R'_3 \cup R'_4 \cup R'_5 \cup R'_6\}$, 为二级实时判据集合; $Y = \{Y_1 \cup Y_2 \cup Y_3 \cup Y_4\}$, 为一级预估判据集合; $Y' = \{Y'_1 \cup Y'_2 \cup Y'_3 \cup Y'_4\}$, 为二级预估判据集合; $l = 1, 2, 3, 4, 5, 6; k = 1, 2, 3, 5, 6; i, j = 1, 2, 3, 4$ 。

2.4.3 系统决策层 Agent 综合决策流程

系统决策层 Agent 综合决策流程如图 2 所示。

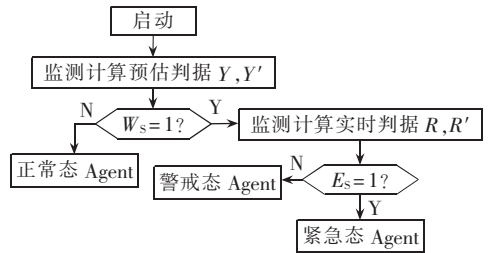


图 2 系统层紧急电压态势综合决策流程

Fig.2 The synthesis decision making for system level voltage tendency

3 就地层多判据电压紧急态势决策方法

3.1 就地电压态势实时判据

3.1.1 负荷高位快速攀升判据

$$F_1 = \begin{cases} 1 & \text{if } (g_1 = 1) \cap (g_2 = 1) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (18)$$

$$g_1 = \begin{cases} 1 & \text{if } \alpha \geq \theta_1 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (19)$$

$$g_2 = \begin{cases} 1 & \text{if } P \geq P_{\max, h} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

式中 $\alpha = \Delta P / \Delta t$, 为就地枢纽节点负荷在间隔 Δt 时间内的实时攀升速率; $P_{\max, h}$ 为就地枢纽节点负荷历史记录的最大值; $\theta_1 = 0.9 \times \alpha_{\max, h}$, $\alpha_{\max, h}$ 为 α 历史记录的最大值。

3.1.2 阻抗模相对裕度判据

$$F_2 = \begin{cases} 1 & \text{if } \gamma \leq \theta_2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (20)$$

式中 γ 为就地枢纽节点阻抗模相对裕度。

3.1.3 $P-U$ 曲线斜率态势判据

$$F_3 = \begin{cases} 1 & \text{if } \eta \geq \theta_3 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (21)$$

$$\theta_3 = -|\eta|_{\max, h} \quad (22)$$

式中 $\eta = \Delta U / \Delta P$, 为就地枢纽节点 $P-U$ 曲线斜率实时值; θ_3 为 η 历史记录的最大值。

3.1.4 低压减载电压限值裕度判据

$$F_4 = \begin{cases} 1 & \text{if } U \leq \theta_4 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (23)$$

式中 U 为就地枢纽节点电压实时值; θ_4 为常规低压减载电压限值。

3.2 就地控制执行层紧急决策

通过 3.1.1~3.1.4 就地电压态势实时判据的有机组合, 形成就地控制执行层 Agent 电压紧急态势程度决策表, 将电压态势紧急程度分为 3 个等级, 其紧急程度从 I 到 III 递减, 见表 2。

表 2 就地控制执行 Agent 紧急态势程度决策表
Tab.2 The decision making of local control agent

序号	紧急判据组合	紧急级别
1	$F_l = 1$	I 级
2	$\left\{ (F_l = 1) \cap (F_i = 1 \cap F_j = 1) \right\} = 1$ $F_i, F_j \cup F \quad i, j > 1 \quad i \neq j$	II 级
3	$\left\{ (F_l = 1) \cap (\exists F_k = 1) \right\} = 1$ $F_k \cup F \quad k > 1$	III 级

表中 $F = \{F_1 \cup F_2 \cup F_3 \cup F_4\}$, 为枢纽节点就地紧急实时判据集合; $l=1, 2, 3, 4; i, j, k=2, 3, 4$ 。

3.3 就地控制执行层 Agent 综合决策算法

3.3.1 就地紧急状态实时判定

原则: 如果就地枢纽节点有 1 个实时判据为 1, 则该节点进入紧急状态。

$$E_L = \begin{cases} 1 & \text{if } \exists F_k = 1, F_k \in F \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (24)$$

表 3 系统层紧急态势判据计算结果

Tab.3 The criterion data of system level coordination agent

运行状态	γ_A	节点	η_B	节点	λ_F	λ_R	T_F	T_R	μ_B	节点	L_i	F_i	U_c	节点	Δf
S_{s1}	0.229 454	30	-0.365 678	20	0.20	0.10	33.0	32.0	-0.359 965	20	0	0	0.800 683	30	0.001 2
S_{s2}	0.229 454	30	-0.365 678	20	0.20	0.20	35.0	34.0	-0.365 678	20	0	0	0.794 302	30	0.001 0
S_{s3}	0.190 190	30	-0.385 415	20	0.50	0.40	36.0	37.0	-0.378 349	20	0	0	0.780 750	30	0.001 0
S_{s4}	0.204 007	30	-0.378 349	20	0.40	0.50	37.0	36.0	-0.385 415	20	0	0	0.773 519	30	0.001 0
S_{s5}	0.167 812	30	-0.397 250	29	0.65	0.63	37.5	37.0	-0.395 468	20	0	0	0.763 583	30	0.001 1
S_{s6}	0.166 242	30	-0.398 145	29	0.66	0.65	38.0	40.0	-0.397 250	29	0	0	0.761 994	30	0.001 1
S_{s7}	0.170 927	30	-0.395 468	20	0.63	0.66	40.0	39.0	-0.398 145	29	0	0	0.761 194	30	0.001 0
S_{s8}	0.166 242	30	-0.398 145	29	0.66	0.67	41.0	40.0	-0.399 048	29	0	0	0.760 388	30	0.104 0

运行状态	Y_1	Y_1'	Y_2	Y_2'	Y_3	Y_3'	Y_4	Y_4'	R_1	R_1'	R_2	R_2'	R_3	R_3'	R_4	R_4'	R_5	R_5'	R_6	R_6'
S_{s1}	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_{s2}	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
S_{s3}	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
S_{s4}	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
S_{s5}	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1
S_{s6}	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1
S_{s7}	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1
S_{s8}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1

式中 $F = \{F_1 \cup F_2 \cup F_3 \cup F_4\}$, 为枢纽节点就地实时判据集合。

3.3.2 Agent 综合决策流程

就地控制执行层 Agent 综合决策流程图如图 3 所示。

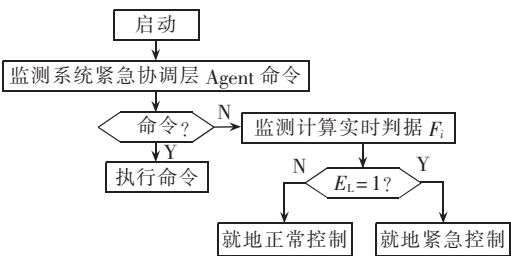


图 3 就地紧急电压态势综合决策流程

Fig.3 The synthesis decision making for local voltage tendency

首先, 判断是否有系统紧急协调层 Agent 的命令, 若有则执行, 然后监测就地实时判据 $F_i (i=1 \sim 4)$, 若 E_L 为 1, 则进入紧急状态, 继续判断态势发展情况, 并采取相应的控制措施; 若 E_L 为 0, 则按照正常态势下的模糊控制策略调控电压无功。

4 算例及其分析

以 IEEE 30 节点系统(参数取自文献[20])为基础, 重点对系统决策层 Agent、系统协调层 Agent, 及就地控制执行层 Agent 的多判据综合决策过程, 进行仿真计算, 详见表 3、表 4。

4.1 系统层紧急态势决策过程

算例中的负荷节点有功功率和无功功率等比例、等功率因数高位攀升为例^[21], 负荷高位起点取系统总负荷为有功功率 481.78 MW、无功功率 214.54 Mvar。选择节点 2, 7, 20, 29 和 30 为系统的枢纽节点, 并作为观察节点。阈值 $\theta_A = 0.18, \theta'_A = 0.198; \theta_B = -0.361$,

表 4 节点 30 就地层紧急态势判据计算结果
Tab.4 The criterion data of bus 30 local agent_{p.u.}

运行 状态	α	P	γ	η	U	判据值			
						F_1	F_2	F_3	F_4
S_{T1}	0.10	0.180922	0.241226	-0.357624	0.800683	0	0	0	0
S_{T2}	0.20	0.181646	0.229454	-0.363645	0.794302	0	0	0	0
S_{T3}	0.40	0.183101	0.204007	-0.377136	0.780750	0	0	0	0
S_{T4}	0.50	0.183831	0.190190	-0.384691	0.773519	0	0	0	0
S_{T5}	0.63	0.184784	0.170927	-0.395460	0.763583	1	0	1	0
S_{T6}	0.65	0.184931	0.167812	-0.397250	0.761994	1	1	1	0
S_{T7}	0.66	0.185005	0.166242	-0.398145	0.761194	1	1	1	0
S_{T8}	0.67	0.185078	0.164658	-0.399048	0.760388	1	1	1	0

$\theta'_B = -0.34295; \lambda_H = 0.66, \lambda'_H = 0.594; T_H = 40, T'_H = 36;$
 $k_B = -0.38, k'_B = -0.361; \theta_C = 0.75, \theta'_C = 0.80; \tau_D = 0.1,$
 $\tau'_D = 0.095。$

表 3 给出了对应 8 种实时高位攀升状态($S_{s1} \sim S_{s8}$)下的电压态势预估和实时判据计算结果,据此可以计算出对应于 $S_{s1} \sim S_{s8}$ 的系统警戒状态值 W_s 、系统紧急状态值 E_s ,具体结果为:8 种运行状态下的系统警戒状态值 W_s 均为“1”;系统紧急状态值 E_s 除 S_{s1} 运行状态下为“0”外,其余 7 种状态下均为“1”。因此,系统决策层 Agent 根据 E_s 和 W_s 的结果判定: $S_{s1} \sim S_{s8}$ 运行状态下系统均处于警戒状态,且在 $S_{s2} \sim S_{s8}$ 运行状态下,系统处于紧急状态。对于进入紧急状态的 $S_{s2} \sim S_{s8}$,系统协调层紧急态 Agent 进而可计算出相应的系统紧急级别分别为 $S_{s2} \sim S_{s3}$ 运行状态下为Ⅶ级, $S_{s4} \sim S_{s6}$ 运行状态下为Ⅵ级, S_{s7} 运行状态下为Ⅴ级, S_{s8} 运行状态下为Ⅳ级。

因此,根据上述系统决策层 Agent 的综合决策结果,按照各层 Agent 之间的协同机制,针对不同的紧急级别,采取相应的控制措施。

从表 3 还可以看出,系统中电压稳定裕度最小的枢纽节点为 30 号节点,应对其予以重点监视,采取措施,并要观察措施实施后的效果。

4.2 就地层紧急态势决策过程

以节点 30 为例,阈值设定为 $\theta_1 = 0.63, \theta_2 = 0.17,$
 $\theta_3 = -0.39, \theta_4 = 0.75, P_{\max,h} = 0.169。$

表 4 给出了对应 8 种实时高位攀升状态($S_{T1} \sim S_{T8}$)下的实时判据 $F_i(i=1 \sim 4)$ 的计算结果(实时值),据此可以计算出对应于 $S_{T1} \sim S_{T8}$ 的节点 30 就地控制执行 Agent 的紧急状态值 E_L 。从表 4 可以看出 $S_{T5} \sim S_{T8}$ 已进入紧急状态,其紧急态势程度分别为: S_{T5} 为Ⅲ级, $S_{T6} \sim S_{T8}$ 为Ⅱ级。因此,节点 30 就地控制执行 Agent 根据多判据综合决策结果,按电压紧急状态的级别分别采取相应的措施。

5 结语

电力市场下的电网运行将面临更加复杂多变的环境,多判据判断电压态势的紧急程度,有助于准确观察电压态势,以便及时采取措施,确保系统的稳定运行。

分层的结构有利于各层 Agent 发挥独立自治的作用,又可以通过各层 Agent 之间的协作,按照高效的协同机制,发挥系统的整体效应。

算例表明,本文提出的基于多 MAS 的多判据分层电压紧急控制系统,能够较好地满足电压态势紧急情况下的监测与控制,具有较高的实时性、自适应性和准确性,适合于在线监测和控制电压紧急态势。

参考文献:

[1] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J]. 电网技术,2003,27(9):2-6.
HU Xue-hao. Rethinking and enlightenment of large scope blackout in interconnected North America power grid[J]. **Power System Technology**,2003,27(9):2-6.

[2] 印永华,郭剑波,赵建军,等. 美加“8.14”大停电事故初步分析以及应吸取的教训[J]. 电网技术,2003,27(10):8-11.
YIN Yong-hua, GUO Jian-bo, ZHAO Jian-jun, et al. Preliminary analysis of large scale blackout in interconnected North America power grid on August 14 and lessons to be drawn[J]. **Power System Technology**,2003,27(10):8-11.

[3] 周孝信,郑健超,沈国荣,等. 从美加东北部电网大面积停电事故中吸取教训[J]. 电网技术,2003,27(9):1.
ZHOU Xiao-xin, ZHENG Jian-chao, SHEN Guo-rong, et al. Lessons from large scale blackout in interconnected North America power grid[J]. **Power System Technology**,2003,27(9):1.

[4] 刘鹏,吴刚. 世界范围内两起典型电压崩溃事故分析[J]. 电网技术,2003,27(5):35-37.
LIU Peng, WU Gang. Analyses of two typical voltage collapse incidents worldwide[J]. **Power System Technology**,2003,27(5):35-37.

[5] CHUNG T S, FU Y A. Fast voltage security assessment method via extended ward equivalent and neural network approach[J]. **IEEE Power Engineering Review**,1999,19(10):40-43.

[6] 王芝茗,王漪,柳焯. 关键负荷节点集合电网侧戴维南参数预估[J]. 中国电机工程学报,2002,22(2):16-20.
WANG Zhi-ming, WANG Yi, LIU Zhuo. Prediction of Thevenin equivalent parameters on electrical power network side for the muster of key load nodes[J]. **Proceedings of the CSEE**,2002,22(2):16-20.

[7] 王漪,柳焯. 基于戴维南等值的系统参数跟踪估计[J]. 电网技术,2000,24(11):28-30.
WANG Yi, LIU Zhuo. Tracking and estimation of system parameter using Thevenin equivalent[J]. **Power System Technology**,2000,24(11):28-30.

[8] 李娟,刘修宽,曹国臣,等. 一种面向节点的电网等值参数跟踪估计方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(3):30-33.
LI Juan, LIU Xiu-kuan, CAO Guo-chen, et al. A tracking and estimation method for network equivalent parameters of facing the node[J]. **Proceedings of the CSEE**,2003,23(3):30-33.

[9] VU K, BEGOBIC M M, NOVOSEI D, et al. Use of local measurement to estimate voltage stability margin[J]. **IEEE Trans on PWRs**,1999,14(3):1029-1035.

[10] 鲁宝春,姚玉斌,郭志忠,等. 一种实用的静态电压稳定判据[J]. 电力系统及其自动化学报,1999,11(3):8-11.
LU Bao-chun, YAO Yu-bin, GUO Zhi-zhong, et al. The

- practical steady state voltage stability indices of power systems[J]. **Proceedings of the EPSA**,1999,11(3):8-11.
- [11] 柳焯. 基于节点阻抗解析的电压稳定性评估[J]. 中国电机工程学报,1999,19(11):64-68.
- LIU Zhuo. Voltage stability evaluation based on node load impedance analyses[J]. **Proceedings of the CSEE**,1999,19(11):64-68.
- [12] 柳焯. 电压稳定问题中重负荷节点的阻抗解析[J]. 中国电机工程学报,2000,20(4):35-39.
- LIU Zhuo. The impedance analyses of heavy load node in voltage stability studies[J]. **Proceedings of the CSEE**,2000,20(4):35-39.
- [13] 王芝茗. 辽宁电网电压稳定问题研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2002.
- WANG Zhi-ming. Study on voltage stability of Liaoning electric network[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2002.
- [14] 柳焯. 弱节点紧急运行模式解析[J]. 继电器,1998,26(2):1-5.
- LIU Zhuo. Analysis of urgent operating patterns for weak nodes[J]. **Relay**,1998,26(2):1-5.
- [15] WOOLDRIDGE M J,JENNINGS N R. Intelligent agents: theory and practice, knowledge[J]. **Engineering Review**,1995,10(2):115-152.
- [16] 蒋云良,徐从富. 智能 Agent 与多 Agent 系统的研究[J]. 计算机应用研究,2003,20(4):31-34.
- JIANG Yun-liang,XU Cong-fu. Intelligent agent and multi-agent system[J]. **Application Research of Computers**,2003,20(4):31-34.
- [17] 曹立霞,历吉文,程新功,等. 基于多 Agent 技术的分布式电压无功控制系统[J]. 电网技术,2004,28(7):30-33.
- CAO Li-xia,LI Ji-wen,CHENG Xin-gong,et al. Distributed optimal voltage / reactive power control system based on multi-agent system[J]. **Power System Technology**,2004,28(7):30-33.
- [18] 王成山,余旭阳. 基于 Multi-Agent 系统的分布式协调紧急控制[J]. 电网技术,2004,28(3):1-5.
- WANG Cheng-shan,YU Xu-yang. Distributed coordinative emergency control based on multi-agent system[J]. **Power System Technology**,2004,28(3):1-5.
- [19] 王明俊. CBR 和 Multi-Agent 在电力系统安全控制中的应用[J]. 电网技术,2004,28(8):1-5.
- WANG Ming-jun. Application of case based reasoning and multi-agent in power system security control[J]. **Power System Technology**,2004,28(8):1-5.
- [20] 张伯明,陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京:清华大学出版社,1996.
- [21] 柳焯,潘毅,唐降龙,等. 基于前沿陡升信息保持策略的高峰负荷预报研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(5):12-17.
- LIU Jin,PAN Yi,TANG Xiang-long,et al. Research on peak load forecasting based on the strategy for pre-serving steep rise information of front position[J]. **Proceedings of the CSEE**,2004,24(5):12-17.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

李来福(1966-),男,江苏沛县人,高级工程师,博士研究生,研究方向为电力系统分析和自动控制(E-mail:llf@jsepc.com.cn);

王芝茗(1954-),男,辽宁沈阳人,高级工程师,博士,研究方向为电力系统运行调度;

于继来(1965-),男,江苏扬州人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统模式分析和灵活交流输电系统(E-mail:yupwrs@hit.edu.cn);

柳焯(1929-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统分析和电力系统优化调度(E-mail:song@hit.edu.cn)。

Hierarchical system with multi-criterion for voltage emergency control based on MAS

LI Lai-fu^{1,2}, WANG Zhi-ming³, YU Ji-lai¹, LIU Zhuo¹

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

3. Liaoning Electric Power Dispatching and Communication Center, Shenyang 110006, China)

Abstract: Due to the limitations of single criterion decision making and single level monitoring voltage stability, a hierarchical system with multi-criterion for voltage emergency control based on MAS(Multi-Agent System) is proposed. The system structure, criterion principle for each voltage emergency state and tendency of every level agent, method and process of synthesis decision making with multi-criterion, and coordination control rule of every level agent under voltage emergency states are presented. The hierarchical structure not only makes every level agent work on its own yield well, but also gives the whole system effect by the coordination among level agents. The synthesis decision making with multi-criterion for the level of voltage emergency may contribute to accurate determination of voltage tendency for further control. A test on IEEE 30-bus system shows that, it monitors and controls the voltage state and tendency well and its real-time, adaptive and accurate performances suitable for on-line voltage emergency state and tendency monitoring and control.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(59477010; 50477008) and Research Fund for Doctorial Speciality of Higher Education(20040213031).

Key words: power system; multi-criterion decision making; hierarchical voltage emergency control; multi-agent system