

基于多代理技术的低频低压减负荷控制

侯玉强, 方勇杰, 杨卫东, 任先成, 刘福锁

(国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003)

摘要: 随着互联大电网的电压、频率稳定问题日益复杂, 其分析和控制应进一步在全局范围内协调考虑。传统的低频低压减负荷控制方法, 对分散安装在各地的控制装置缺乏协调, 不利于实现系统整体控制的实时协调和优化。文中提出一种基于多代理技术实现多个就地减负荷控制装置协调动作的新方法。其核心思想是基于节点电压频率动态的空间分布特性, 并计及当前工况及系统受扰程度自动调整减负荷控制策略。IEEE 14 节点系统及国内某实际电网的时域仿真结果均验证了该方法的有效性。

关键词: 低频减负荷; 低压减负荷; 多代理系统; 协调控制; 电压稳定; 频率稳定

0 引言

电网互联格局的形成, 在提高系统整体运行经济性和更大范围内资源优化利用效率的同时, 也使得全系统的动态行为更加复杂, 极端严重故障下的电压稳定和频率稳定问题更加突出。防止电力系统崩溃瓦解, 甚至大面积停电事故的发生, 是电力系统运行部门最重要的职责之一。长期以来, 低频低压减负荷作为电力系统安全稳定的最后一道防线^[1-2], 为保证系统安全稳定运行和避免大面积停电事故的发生发挥了重要作用。

然而, 传统的低频低压减负荷控制仅依赖于就地频率或电压的下降情况触发控制装置动作, 在装置的动作逻辑中没有计及远方信息, 难以准确把握全系统的动态特性; 而且减负荷控制方案一旦整定好, 便不再随实际工况的变化而变化。对以往大停电事故的分析也发现, 传统减负荷控制装置不能及时、正确地反应于系统动态的情形^[3], 某些情况下甚至难以较好地满足系统安全稳定的需要^[4]。

大量分析和仿真试验均表明, 电力系统受扰后不同节点的电压动态及频率动态不仅存在时间分布特性, 而且常常存在空间分布特性^[5], 尤其对那些网络规模大、地域跨度广、结构复杂的电网, 其空间分布特性可能存在较大差异。传统低频低压减负荷控制未能在实时控制算法中计及受扰系统电压动态或频率动态的空间分布特性, 对分散在各地的减负荷控制缺乏协调, 难以实现系统整体控制的协调和优

化; 固定的减负荷控制方案也无法在运行工况变化时及时对控制策略作出调整, 从而可能出现严重的欠控制或过控制^[6]。国内外多次大停电事故表明, 研究基于现代通信技术的新型自动减负荷控制方法十分必要。

近年来, 多代理系统 (multi-agent system, MAS) 技术日趋成熟, 为实现复杂系统的协调控制提供了新的研究途径^[7]。MAS 是由多个代理组成的一个松散耦合的联盟, 通过各代理间的通信协作完成超出单个代理能力或知识的任务, 是近年来新兴的计算机工程技术之一^[8-9]。多代理技术非常适用于动态、分布、开放的复杂电力系统, 已经在电力系统诸多方面得到广泛应用^[10-14], 但至今尚未应用于电力系统安全稳定第三道防线。本文运用多代理技术, 提出一种可协调各就地低频低压减负荷控制装置, 自适应调整减负荷控制策略的低频低压减负荷控制新方法。

1 系统框架及功能

1.1 系统框架

MAS 的体系结构对各代理之间的异步性、一致性和自主性有较大影响, 并决定着代理间信息的共享方式和通信方式。考虑到电力系统分层分区控制和运行模式, 本文采用图 1 所示的 4 层复合结构实现大电网的低频低压减负荷协调控制。

为实现基于多代理技术的减负荷控制, 需针对电网在多种工况下可能发生的极端严重故障, 深入分析系统安全稳定特性, 并结合电网拓扑结构和减负荷控制装置的实际布点, 将电网划分为一个或若干个子分区, 每个子分区划分为若干个局部分区; 分

收稿日期: 2010-09-01; 修回日期: 2010-11-21。

国家电网公司“基于多代理技术的低频低压减负荷技术研究”项目; 已申请国家发明专利(申请号: 201010195017.9)。

别在每个子分区和局部分区内选择某枢纽变电站作为子区协调层和局部协调层,并以某个典型的子区协调层作为全网协调层;各就地减负荷控制装置作为就地反应层;各层代理仅与其上层代理建立通信联系。

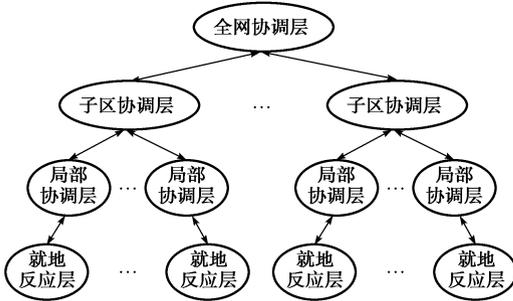


图1 基于MAS的低频低压减负荷控制框架
Fig.1 Control frame of UFLS/UVLS based on MAS

图1所示的MAS协调控制框架,一方面充分利用了电网分层分区运行和控制模式,极大地简化了通信系统的复杂度;另一方面,若就地反应层在指定延期内收到上层代理下发的控制指令,则调整当前的减负荷控制策略,否则仍按既定策略触发装置动作,从而不会影响第三道防线的可靠性。

1.2 各层代理的功能

1) 就地反应层

就地反应层实时测量装置安装处母线的电压、频率及其变化率,在判定装置满足动作条件时触发装置动作,分轮次实施减负荷。

同时,就地反应层一方面根据实时测量的就地电压、频率计算母线电压跌落和频率跌落,根据装置安装处母线的负荷有功功率和装置已切负荷量信息计算母线功率不平衡量,并将母线功率不平衡量及装置初始减负荷方案下安排的当前动作轮减负荷量(下称“节点初始可切量”)上传至局部协调层;另一方面,接收局部协调层下达的减负荷控制策略调整指令,据此调整当前控制策略。

2) 局部协调层

局部协调层对各就地反应层上传的信息进行加工,得到局部分区电网的电压和频率跌落指标、局部功率不平衡量及局部初始可切量信息,并上传至子区协调层;同时,对子区协调层下达的控制信息进行解读,生成针对各就地反应层的减负荷控制策略调整指令并下达至各就地反应层。

3) 子区协调层

对局部协调层上传的信息进行加工,得到子分区电网的电压和频率跌落指标、子区功率不平衡量及子区初始可切量信息;同时,子区协调层根据局部

协调层上传信息计算针对各局部协调层的局部减载加重系数,实现各局部协调层的差异化控制。

4) 全网协调层

利用子区协调层上传信息,全网协调层计算针对各子区协调层的全网减载调节因子和子区减载加速系数,前者用于对全网的减负荷控制策略进行调整,避免造成严重过切;后者用于决定各子分区内的减负荷控制装置是否加速或取消本轮次动作。

2 MAS协调控制策略

2.1 MAS协调控制流程

本文提出的基于MAS的低频低压减负荷控制流程分别如图2、图3所示。其特点在于存在2个同时进行的过程:①就地反应层对就地电压或频率的变化快速反应,一旦满足动作条件即可触发装置动作,确保了减负荷控制装置动作的可靠性;②底层代理实时将相关信息上传至上层代理,并不断接收上层代理下达的控制指令,结合当前工况信息,对当前减负荷控制策略进行调整。

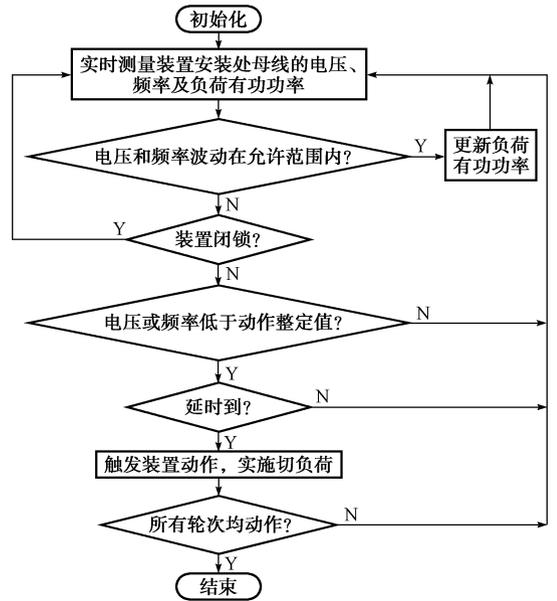


图2 MAS中就地反应层的动作流程
Fig.2 Control logic of local response agent

2.2 底层代理与上层代理协调控制的实现

由1.2节可知,就地反应层不仅完成就地低频低压减负荷控制,还将就地减负荷控制装置所在母线电压跌落、频率跌落及就地负荷母线功率不平衡量和节点初始可切量信息上传至上层代理。

以低压减负荷控制为例,记时刻 t 装置所在母线电压为 $U(t)$, 母线额定电压为 U_0 , 定义就地反应层母线电压跌落 $\Delta U_r(t)$ 为:



图3 MAS协调控制流程

Fig.3 Coordination flow chart of MAS

$$\Delta U_r(t) = \frac{U_0 - U(t) + \Delta U_r(t')}{2} \quad (1)$$

式中:下标 r 代表就地反应层; t' 为上一次采样时刻。

一般而言,子分区间的电气距离较子分区内局部分区间的电气距离远,其电压动态空间分布更明显。因此,本文拟采用“局部加重切、子区加速切”的协调控制方法。

局部协调层和子区协调层所在分区电网的电压跌落指标如下式所示(省略下标 t):

$$\Delta U_a = w\Delta\bar{U}_{a-1} + (1-w)\Delta U_{(a-1)\max} \quad (2)$$

式中:下标 a 代表局部协调层或子区协调层;下标 $a-1$ 代表与其对应的下层代理; $\Delta\bar{U}_{a-1}$, $\Delta U_{(a-1)\max}$ 分别为下层代理电压跌落平均值和最大值; w 为加权因子。

子区协调层利用下式计算针对下属各局部协调层的局部减载加重系数 F_L :

$$F_L = K_c(\Delta U_{a-1} - \Delta\bar{U}_{a-1}) \quad (3)$$

式中: K_c 为调节系数,典型值为 2.0~5.0。

若记 $P_{\Sigma G}$, $P_{\Sigma L}$, $P_{\Sigma T}$ 分别为 n 节点电网内的发电总量、负荷总量和该电网从主网受入的功率总量。不计各类网损的情况下,网内始终存在如下功率平衡方程:

$$P_{\Sigma T}(t) + P_{\Sigma G}(t) = P_{\Sigma L}(t)$$

从而,时刻 t 有如下等式成立:

$$\Delta P_{\Sigma T}(t) + \Delta P_{\Sigma G}(t) = \Delta P_{\Sigma L}(t)$$

式中: $\Delta P_{\Sigma G}(t)$, $\Delta P_{\Sigma L}(t)$, $\Delta P_{\Sigma T}(t)$ 分别为 $t=0$ 时电网内的发电总量、负荷总量和该电网从主网受入的功率总量与当前时刻相应功率之差。

可见, $\Delta P_{\Sigma L}$ 计及了在受入功率变化和网内发电机出力变化共同作用下全网负荷功率的不平衡程度。然而,电网内实际可控的负荷节点数 l 却远小于总节点数 n , 记 P_{L0i} 和 $P_{Li}(t)$ 分别为可控母线 i ($i \leq l$) 在初始工况下和受扰后动态过程中的负荷有功功率; P_{LSi} 和 ΔP_{LSi} 分别为母线 i 的减负荷控制装置在初始减负荷方案下当前动作轮次安排的减负荷量和装置已切负荷量。定义全网负荷不平衡量为上述 l 个节点的负荷功率不平衡总量与全网已切负荷量之差,全网负荷可控量为网内控制装置当前动作轮次减负荷量之和,记两者之比为全网减载调节因子 F_w :

$$F_w = \frac{\sum_{i=1}^l (P_{L0i} - P_{Li}(t)) - \sum_{i=1}^l \Delta P_{LSi}}{\sum_{i=1}^l P_{LSi}} \quad (4)$$

利用该指标对全网内的低频低压减负荷控制装置动作轮次的减负荷量进行调整,在确保频率、电压快速恢复的同时有效避免发生严重过切。

图4为子区协调层的子区减载加速系数 F_s 的计算流程,其中 F_{wset} , U_{err} , U_{max} , U_{acc} 均为整定参数。

子区协调层接收全网减载调节因子 F_w 和子区减载加速系数 F_s , 并下发至局部协调层。

记某局部分区电网内就地反应层总数为 R_s , r ($1 \leq r \leq R_s$) 为就地反应层在电压跌落由大到小动态排序时的次序,局部协调层根据上述参数计算针对本局部分区内各就地反应层的轮次加重系数 K_r :

$$K_r = \begin{cases} F_L + 0.1 \frac{R_s - r + 1}{R_s} & F_L \geq 0 \\ F_L - 0.1 \frac{r}{R_s} & F_L < 0 \end{cases} \quad (5)$$

由此可见,轮次加重系数 K_r 计及了局部分区内各就地反应层间的电压空间分布;子区减载加速系数 F_s 计及了子区协调层间的电压空间分布;全网减载调节因子 F_w 反映了因各种可能扰动导致的电网功率缺额与电网可切负荷量之间的关系。利用上

述指标, MAS 对各就地反应层的控制装置的动作轮次及减负荷量进行调整, 在电压跌落严重的区域或节点加速或加重控制, 反之则减轻或取消控制, 如下式所示:

$$P_{mr}' = \begin{cases} 0 & F_s = -1 \text{ 或 } F_w \leq 0 \\ F_w(1+K_r)P_{mr} & F_s = 0 \\ F_w(1+K_r)(P_{mr} + P_{(m+1)r}) & F_s = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_{mr} 和 $P_{(m+1)r}$ 分别为就地反应层 r 当前动作轮次 m 及下一轮次 $m+1$ 在初始减负荷方案下整定的减负荷量; P_{mr}' 为调整后的减负荷量, 依据初始减负荷方案并按过切原则即可确定动作轮次。

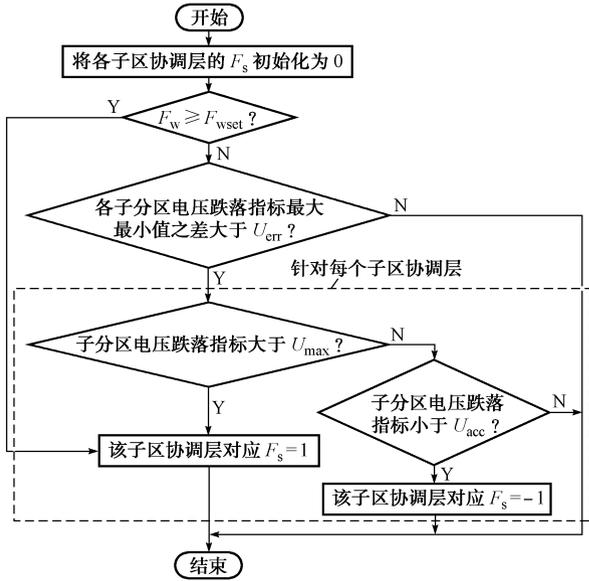


图 4 针对子区协调层的 F_s 计算流程
Fig. 4 Calculation flow chart of F_s for sub-area coordination agent

3 仿真算例

将新方法的控制算法和动作逻辑在电力系统安全稳定量化分析软件 FASTEST 中实现, 采用 IEEE 14 节点系统和某实际受端电网进行时域仿真。

3.1 仿真算例 1: IEEE 14 节点系统

系统接线图及负荷分区方案见附录 A 图 A1。BUS-6 电厂全停后, 受端各负荷节点的电压 (标么值, 下同) 和频率响应曲线如图 5 所示。

基于附录 A 表 A1 所示的低频低压减负荷控制方案, 并考虑控制装置各轮次重叠配置, 以电压跌落最严重的节点作为监测节点 (下同), 其暂态电压和频率动态响应曲线如图 6 所示。可见, 传统的低频低压减负荷控制方法仅依赖就地状态量信息而动作, 某些情况下难以恢复系统电压、频率至可接受水

平; 基于 MAS 的减负荷控制方法计及了全网减载调节因子和各负荷节点状态量的空间分布特性, 并根据工况及受扰程度的不同自动调整减负荷量, 有效抑制系统电压、频率大幅下降; 当判断功率恢复后避免装置继续动作, 在恢复系统电压、频率稳定的同时避免发生严重过切。

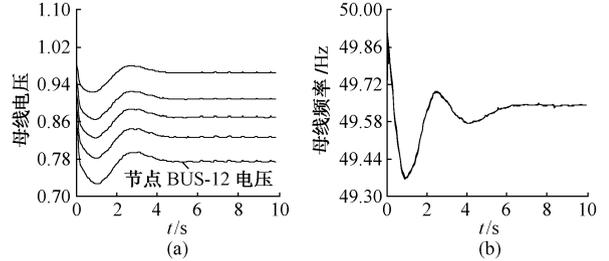


图 5 BUS-6 电厂全停后各节点电压和频率响应曲线
Fig. 5 Voltage and frequency responses of load buses after sudden loss of BUS-6 power plant

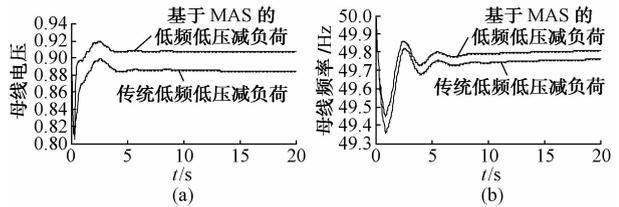


图 6 基于不同减负荷方法时节点 BUS-12 的暂态电压和暂态频率响应曲线
Fig. 6 Transient voltage and frequency responses of BUS-12 under different load shedding methods

3.2 仿真算例 2: 某实际受端电网

某实际受端电网的 500 kV 主网架结构见附录 A 图 A2, 图中略去了通过各 500 kV 主变压器入网的 220 kV 及 110 kV 负荷节点。该电网通过 4 条 500 kV 线路从主网受入功率 4 300 MW, 1 条 ± 600 kV 直流线路从主网受入功率 2 500 MW, 网内负荷总量约 23 700 MW。

针对电网拓扑结构和减负荷控制装置布点情况, 将其划分为 3 个子分区, 其中子分区 1 由 3 个局部分区组成; 子分区 2 和子分区 3 分别由 2 个局部分区组成。发生某类严重故障时, 交流受入断面 4 条 500 kV 线路相继断开, 使得受端孤网内存在大量功率缺额, 各负荷节点的暂态电压和频率动态响应曲线如图 7 所示。

可见, 系统受扰后的动态过程中, 节点间的电压响应呈现强烈的空间分布。基于附录给出的低频低压减负荷控制方案并考虑减负荷控制装置轮次重叠配置, 传统低压减负荷动作 1~2 轮, 由于切负荷量不足导致 17.8 s 时低频减负荷继续动作, 累计切除负荷约 5 600 MW; 而采用基于 MAS 的协调控制方法时, 在故障清除后 0.7 s 内低压减负荷动作 2~3

轮,切除负荷近 5 000 MW,系统电压和频率快速恢复至可接受水平,有效降低了减负荷控制代价。

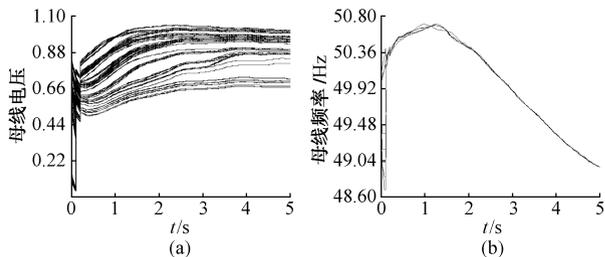


图 7 受扰系统暂态电压和频率响应曲线
Fig. 7 Transient voltage and frequency responses of the disturbed system

采用上述 2 种方法时,监测节点的暂态电压和频率响应曲线如图 8 所示。

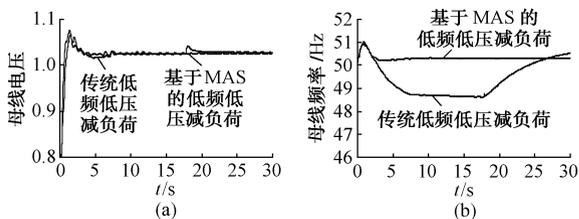


图 8 基于不同减负荷方法时某节点的暂态电压和暂态频率响应曲线
Fig. 8 Transient voltage and frequency responses under different load shedding methods

4 结语

大电网的电压稳定和频率稳定与暂态功角的稳定性一样,应从全系统的角度去分析和控制。传统低频低压减负荷控制方法仅反应于就地电气量的变化,虽有利于保证装置本身动作的可靠性,但却不利于系统整体控制行为的协调和优化。

本文提出基于多代理技术,将远方信息引入本地低频低压减负荷控制并实现对其控制策略的调整和优化,一方面有效降低了事故后果和控制代价;另一方面,其研究成果为改善传统低频低压减负荷控制对现代电网的适应性探索技术出路,有力推进了电网安全稳定第三道防线的协调控制技术。

然而,该控制方法本质上仍是彼此独立的低频减负荷和低压减负荷,如何在计及远方电气量的基础上,考虑电压、频率之间的动态交互影响,进一步改善减负荷控制效果,值得进一步深入研究。

附录见本刊网络版(<http://aepls.sgepri.sgcc.com.cn/aepls/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] KUNDER P. Power system stability and control[M]. New

York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.

[2] DL/T 723—2000 电力系统安全稳定控制技术导则[S]. 北京: 中国电力出版社,2000.

[3] SANAYE-PASAND M. Scrutiny of the Iranian national grid [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(1): 31-39.

[4] 侯玉强,敖雄,顾林. 传统低频低压减负荷判据在现代互联电网中的适应性研究[C]//2008年中国电机工程学会年会论文集, 2008年11月18-19日,西安.

[5] 韩英铎,闵勇,洪绍斌. 复杂扩展式电力系统低频减载方案设计[J]. 电力系统自动化,1992,16(1):34-39.

HAN Yingduo, MIN Yong, HONG Shaobin. Design of large scale multi-machine power system under frequency load shedding scheme[J]. Automation of Electric Power Systems, 1992, 16(1): 34-39.

[6] 侯玉强,方勇杰,杨卫东,等. 综合电压频率动态交互影响的自动减负荷控制新方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(5):24-28.

HOU Yuqiang, FANG Yongjie, YANG Weidong, et al. A new method of automatic load shedding control based on the voltage and frequency dynamics interaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 24-28.

[7] 范玉顺,曹军威. 多代理系统理论、方法与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

[8] STEPHEN D J, EUAN M D, VICTORIA M C, et al. Multi-agent systems for power engineering applications: Part I concepts, approaches and technical challenges[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 1743-1752.

[9] STEPHEN D J, EUAN M D, VICTORIA M C, et al. Multi-agent systems for power engineering applications: Part II technologies, standards and tools for building multi-agent systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 1753-1759.

[10] 刘红进,袁斌,戴宏伟,等. 多代理系统及其在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化,2001,25(19):45-52.

LIU Hongjin, YUAN Bin, DAI Hongwei, et al. Multi-agent system and its application in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(19): 45-52.

[11] 吴俊宏,艾芊,章健,等. 基于多代理技术的VSC-MTDC控制系统[J]. 电力系统自动化,2009,33(19):85-89.

WU Junhong, AI Qian, ZHANG Jian, et al. A VSC-MTDC control system based on multi-agent technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 85-89.

[12] TSAI R, CHEN J L. Design of a distributed problem-solving system for short-term load forecasting[C]// Proceedings of the 35th Midwest Symposium on Circuits and Systems, August 9-12, 1992, Washington DC, USA: 395-399.

[13] 陈振宇,王钢,李海峰,等. 基于智能多代理技术的广域电网协调保护系统[J]. 电网技术,2008,32(5):42-45.

CHEN Zhenyu, WANG Gang, LI Haifeng, et al. A MAS-based coordinated protection system for wide area power network[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 42-45.

[14] 宋依群,高瞻. Agent技术在电力市场中的应用综述[J]. 电力系统及其自动化学报,2008,20(3):111-117.

SONG Yiqun, GAO Zhan. Survey on the application of agent technology in electricity market[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(3): 111-117.

(下转第 50 页 continued on page 50)

侯玉强(1983—),男,通信作者,硕士,助理工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: houyuqiang@sgepri. sgcc. com. cn

方勇杰(1964—),男,博士,研究员级高级工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。

杨卫东(1967—),男,博士,研究员级高级工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。

A New Method of UFLS/UVLS Based on Multi-agent Technology

HOU Yuqiang, FANG Yongjie, YANG Weidong, REN Xiancheng, LIU Fusuo
(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: As the voltage and frequency stability problems of an interconnected power system are becoming increasingly complicated, emphasis should be further placed on coordination in a global perspective for their analysis and control. As traditional under frequency load shedding (UFLS) and under voltage load shedding (UVLS) devices operate independently using local frequency or voltage measurements, it is difficult to achieve real-time coordination and optimization of system-wide control. A new multi-agent system (MAS) based UFLS/UVLS method is presented to coordinate load shedding devices with local and remote information so as to guarantee control performance with less load shedding cost. Its key concept is based on the space distribution characteristics of voltage and frequency dynamics of different load buses while allowing for automatic adjustment of the load shedding control strategy according to the current system operating condition and the degree of disturbance. Time domain simulation results of the IEEE 14-bus power system and a real power system of China demonstrate the effectiveness of the new UFLS/UVLS scheme.

This work is supported by State Grid Corporation of China.

Key words: under frequency load shedding (UFLS); under voltage load shedding (UVLS); multi-agent system; coordinated control; voltage stability; frequency stability

附录 A

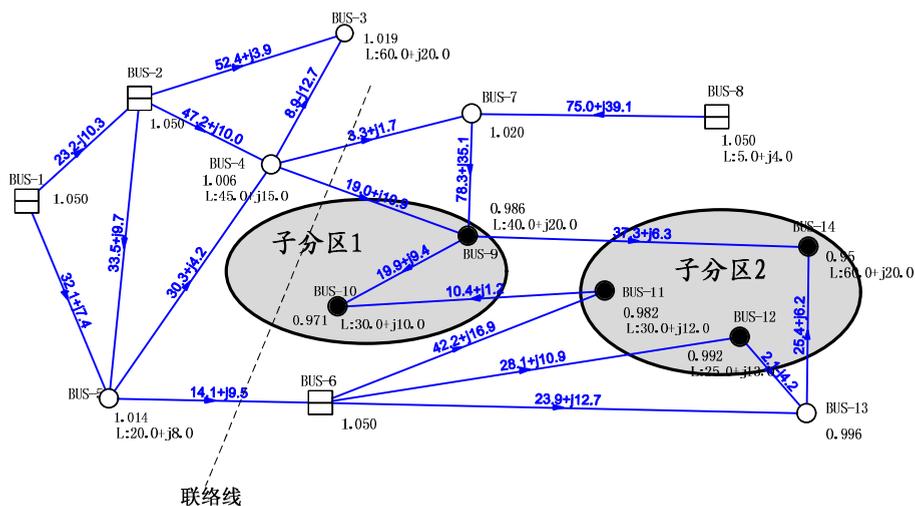


图 A1 IEEE 14 节点系统的负荷分区图

Fig.A1 Load area division of IEEE 14-bus system

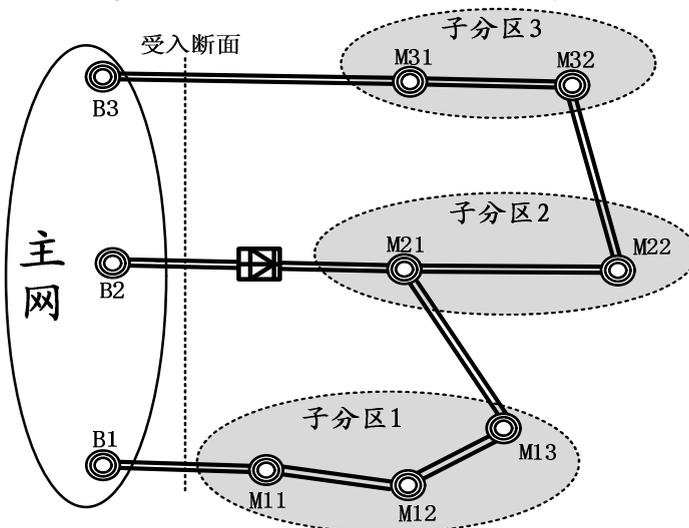


图 A2 某实际受端电网负荷分区图

Fig.A2 Load area division of a real power system

表 A1 低频低压减负荷控制方案

Tab.A1 Control settings of load shedding devices

类型	参数	基本轮			
UFLS	动作值/Hz	49.0	48.8	48.6	48.4
	延时/s	0.3	0.3	0.3	0.3
	减负荷比例/%	8.0	8.0	8.0	8.0
UVLS	动作值/pu	0.90 ⁽¹⁾ /0.88 ⁽²⁾	0.88 ⁽¹⁾ /0.85 ⁽²⁾	0.86 ⁽¹⁾ /0.80 ⁽²⁾	
	延时/s	0.3	0.3	0.3	
	减负荷比例/%	8.0	8.0	8.0	

注：标注⁽¹⁾为算例 1 (IEEE 14 节点系统) UVLS 动作值；标注⁽²⁾为算例 2 (某实际受端电网) UVLS 动作值。