

扩展二级电压的多 Agent 协调控制

张 晔, 李蓉蓉

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 基于多 Agent 系统的分布式协调机制, 研究了发生事故的紧急情况下综合考虑多种类型电压控制器 (AVR, SVC, STATCOM) 的扩展二级电压协调控制。在应用一种慢相关技术将电力系统划分为多个电压控制区的基础上, 提出了多 Agent 间进行任务协助请求时的选择原则, 确定了 Agent 间的协调机制。以装设 2 台 SVC, 2 台 STATCOM 和 10 台发电机 AVR 的新英格兰系统为例进行数字仿真, 结果验证了该控制方案的有效性和灵活性。

关键词: 多 Agent 系统; 二级电压控制; 电力系统电压控制; SVC; STATCOM

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)11-0027-04

0 引言

电力系统电压控制可以实行分级分区控制原则, 按空间和时间将电压控制分成 3 级。其中, 二级电压控制是维持系统电压水平、提高系统电压稳定性的最重要的环节, 它负责以协调方式设置区域内各一级电压控制器的参考值, 以达到系统范围内的良好运行性能。二级电压控制最早由法国 EDF 提出和实践, 并且在不断改进其控制方案以适应电网发展的要求^[1,2]。研究经验表明, 在电力系统中采用二级电压控制, 可以有效地提高系统的电压稳定性, 维持系统较好的无功储备水平。

但是, 无论是传统的二级电压控制 (SVC), 还是改进的协调二级电压控制 (CSVC) 都存在一个重要问题, 即需要进行多路数据采集, 将地理上分布的一级电压控制数据集中传给各二级电压控制中心, 由二级电压控制中心计算后再将新的整定值分发给各一级电压控制器。这种集中式控制系统数据通信量大, 控制的实时性、可靠性难以满足需求, 特别是在负荷急剧变化或电力系统发生故障造成电压异常的紧急情况下, 及时地、迅速地调节就近的无功电压控制设备的要求显得更加迫切。

为了解决这些问题, 文献 [3] 首次将多 Agent 的思想用于电力系统的二级电压协调控制, 在电力系统紧急情况下能较好地消除系统的电压偏移。但其考虑的一级电压控制器主要是 SVC 和 STATCOM, 没有充分利用到系统中已有的发电机自动电压调节器 AVR 的调节作用。而传统的二级电压控制的研究和应用都主要依靠发电机的 AVR 实现^[4,5], 在比较恶劣的系统无功储备不足的紧急情况下, 其控制

能力有限。本文基于多 Agent 的分布式控制系统, 对系统中的一级电压控制器进行扩展, 综合考虑系统中的多种无功电压控制设备, 包括 AVR、SVC、STATCOM, 将它们作为具有自治能力的 Agent 进行分散协调控制, 并在系统分区的基础上提出了 Agent 间进行任务协助请求时的选择原则。以装设 2 台 SVC, 2 台 STATCOM 和 10 台发电机 AVR 的新英格兰系统为例进行仿真计算, 证明了该方案的有效性。

1 基于多 Agent 的扩展二级电压协调控制

1.1 二级电压控制的多 Agent 系统

为方便说明, 本文以新英格兰 10 机 39 节点系统为例。

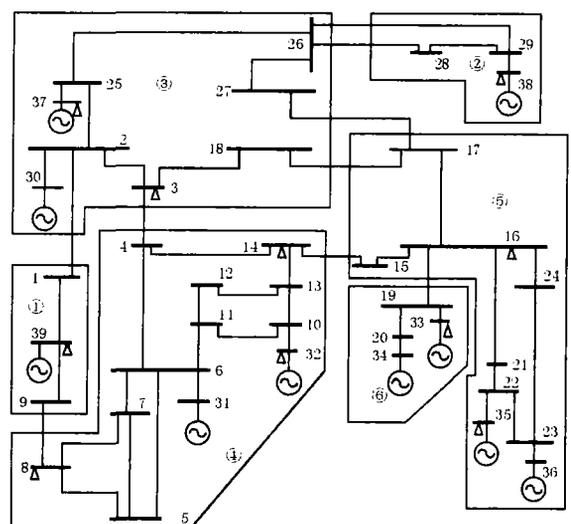


图 1 基于慢相关技术的新英格兰系统分区示意图

Fig 1 Sketch map of New England power system decomposition based on slow coherency method

二级电压控制是一种分区控制,进行控制区域划分能尽量减少区域间的相互关联,使各分区之间是弱耦合关系,从而保证对一个电压控制区的二级电压控制不会导致另一个电压控制区的电压失稳。在综合研究了多种系统电压分区方案,并考虑到基于多 Agent 的分布式协调控制的基础上,作者使用文献 [6] 提出的一种用包括负荷节点在内的慢相关技术 (slow coherency method) 将新英格兰系统分为 6 个电压控制区。电压控制区 1 由 {1, 9, 39} 构成;电压控制区 2 由 {28, 29, 38} 构成;电压控制区 3 由 {2, 3, 18, 25, 26, 27, 30, 37} 构成;电压控制区 4 由 {4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 31, 32} 构成;电压控制区 5 由 {15, 16, 17, 21, 22, 23, 24, 35, 36} 构成;电压控制区 6 由 {19, 20, 33, 34} 构成。分区情况如图 1 所示。

在进行系统分区的基础上,开始选择作为二级电压控制 Agent 的发电机 AVR, 以及 SVC、STATCOM 的安装台数和安装位置。其中 SVC 和 STATCOM 的安装原则应选择系统中的关键节点或获得无功补偿较薄弱的节点。因此,需要对示例系统进行大量动态稳定仿真试验,主要是模拟系统中在发生故障的紧急情况下(如某节点负荷突然增加或某线路突然断线等),各节点电压的变化过程。由试验结果发现:a 节点 3, 4, 5, 7, 8, 16 是系统中获得无功补偿较薄弱的节点,在发生事故的情况下其电压值较易低于允许的节点电压下限 0.95; b 发电机 30, 31, 34, 36 相对其他发电机来说,机端电压更接近节点电压上限 1.05, 无功出力接近饱和状态,参与进行二级电压调节的能力有限。因此,在综合考虑分区情况的基础上,在分区 1 中选择发电机 37 的 AVR 和节点 3 安装 STATCOM 作为 Agent, 记为 AG₃₇, AG₃; 在分区 2 中选择发电机 32 的 AVR 和节点 8、14 分别安装 SVC、STATCOM 作为 Agent, 记为 AG₃₂, AG₈, AG₁₄; 在分区 3 中选择发电机 35 的 AVR 和节点 16 安装 SVC 作为 Agent, 记为 AG₃₅, AG₁₆; 而在分区 4、5、6 中则分别选择发电机 39、38、33 的 AVR 作为 Agent, 记为 AG₃₉, AG₃₈, AG₃₃。在图 1 中对设置了 Agent 的节点以三角形符号进行标注。

在系统中进行 Agent 分布后,每个 Agent 不仅监控其自己所在节点的电压,还通过对自身电压和与其连接线路上电流的测量来评估相邻节点的电压水平。这样,Agent 的覆盖范围就由 Agent 的所在节点和它的临近节点等多个节点构成。从而使构建的多 Agent 系统能够基本上监控系统中的所有节点的电

压水平,增强了系统电压控制的灵活性。上述系统中各 Agent 的分布情况和覆盖范围如表 1 所示。

表 1 各 Agent 分布情况和覆盖范围

Tab 1 Distributions and coverage of Agents

电压控制区	控制器	Agent 名称	安装节点	Agent 覆盖范围
1	AVR ₃₉	AG ₃₉	39	1, 9, 39
2	AVR ₃₈	AG ₃₈	38	28, 29, 38
3	AVR ₃₇	AG ₃₇	37	25, 26, 27, 37
	STATCOM ₃	AG ₃	3	2, 3, 18, 30
4	AVR ₃₂	AG ₃₂	32	6, 10, 11, 32
	STATCOM ₁₄	AG ₁₄	14	4, 12, 13, 14
5	SVC ₈	AG ₈	8	5, 6, 7, 8
	AVR ₃₅	AG ₃₅	35	21, 22, 35
6	SVC ₁₆	AG ₁₆	16	15, 16, 17, 24
	AVR ₃₃	AG ₃₃	33	19, 20, 33, 34

1.2 二级电压控制的多 Agent 任务协调方式

多 Agent 执行任务采用基于通信的任务协调方式,其控制策略如图 2 所示。

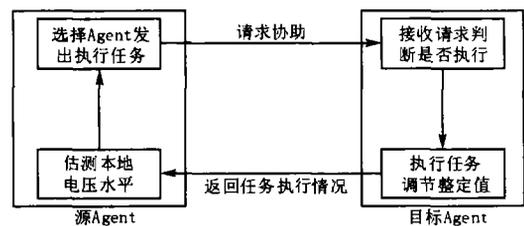


图 2 多 Agent 任务协调机制

Fig 2 Multi-agent task-sharing coordination mechanism

每一 Agent 的主要任务是负责监控其覆盖范围内各节点的电压水平,源 Agent 一旦检测到有节点电压偏离正常值,立即采取相应的控制策略调节电压控制器 (AVR 或 SVC 或 STATCOM) 的参考设定值,使得系统逐步趋向正常运行状态;当偏离值超出单个 Agent 的调节极限并需要其它 Agent 协助完成任务时,它选择一个或几个 Agent,发送任务请求。接收 Agent 检测到该请求并检查与自身的利益是否冲突,如果不冲突,则做出响应执行该任务并向源 Agent 返回成功执行信息,否则认为该电压波动超出二级电压控制的调节范围,任务执行失败。

针对多 Agent 间在进行任务协助请求时的选择顺序问题,作者在定性分析和多次对比仿真试验的基础上,尝试提出以下选择原则:

(1) 尽量选择同一电压控制区内的 Agent 进行协助二级电压控制。这是因为在进行系统分区的时候已经把电压关联比较紧密的节点划到了同一个区域,在同一分区中选择其他 Agent 进行二级电压控制能尽量减少对其他分区节点电压的影响。

(2) 尽量先选择响应速度较快的 SVC 或 STATCOM 进行协助二级电压控制,再选择响应速度较慢的 AVR。这是因为 SVC 或 STATCOM 控制响应的时间常数比较小,一般为几毫秒,而 AVR 从发出控制到节点电压变化一般会经过几秒的响应时间。在系统紧急情况下能否迅速将节点电压恢复至正常范围是评价电压控制系统可靠性和精确性的重要指标,并且装设在系统中的 SVC 或 STATCOM 的无功补偿容量一般都比较小,对它们进行充分地利用能够减少进行协助二级电压控制的次数,在时间和经济上都更加合理,所以应优先选择 SVC 或 STATCOM。

(3) 尽量选择与事故节点电气距离临近的分区内的 Agent 进行协助二级电压控制。在系统电压情况比较恶劣,光靠本电压控制区内 Agent 的二级电压控制已不能消除本区域内的节点电压偏移时,就应向电气距离临近的分区内的 Agent 发出任务协助请求。

上述三条 Agent 选择原则的优先次序按编号递减排列,对他们的说明将在后面的算例分析中得到体现。

2 算例分析

示例的新英格兰系统如图 2 所示。需要说明的是,系统中的 10 台发电机均装设了 IEEE DC1 型的自动电压调节器 AVR,但是由前面的分析可知,发电机 30, 31, 34, 36 的无功出力接近饱和状态,电压调节能力有限,因此,仅选择其余的 6 台发电机 AVR 作为二级电压控制 Agent,另加 2 台 SVC 和 2 台 STATCOM 作为 Agent,这样共有 10 个 Agent 共同构成了多 Agent 控制系统。

下面给出 2 个具有代表性的仿真算例来说明不同的系统紧急情况下,不同类型的二级电压控制 Agent 的组合来消除系统电压偏移的方案。

2.1 算例 1

1 s 时,节点 12 的负荷增加 50%,使 V_{12} 开始下降。5 s 时,连接节点 12 和 13 的线路断线,使 V_{12} 跌落至 0.95 以下。节点 12 的电压越限触发 AG_{14} 启动二级电压控制,但仅靠 AG_{14} 自身已无法消除节点 12 的电压越限。于是, AG_{14} 开始选择其它 Agent 进行二级电压协助控制,根据 Agent 协助选择原则的 1 和 2, AG_{14} 在 6 s 时决定向同一电压控制区中的 SVC 控制器 AG_8 发送电压协助请求。7 s 时, AG_8 回应 AG_{14} 的请求,采取二级电压控制,成功消除了节点

12 的电压越限。仿真结果如图 3 所示。

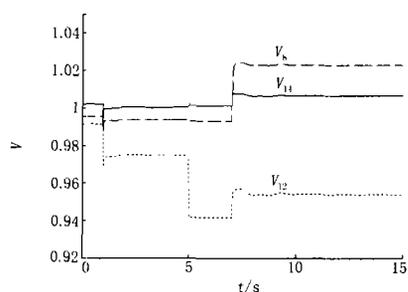


图 3 算例 1 的仿真结果

Fig 3 Simulation result of example No. 1

2.2 算例 2

0.2 s 时,节点 15 的负荷增加 50%,使 V_{15} 开始下降。2 s 时,连接节点 15 和 16 的线路断线,使 V_{15} 跌落至 0.95 以下。在 6 s 时,连接节点 8 和 9 的线路也断线,使 V_{15} 跌落得更加厉害。节点 15 的电压越限触发 AG_{16} 在 4 s 时启动二级电压控制,但仅靠 AG_{16} 自身已无法消除节点 15 的电压越限。于是, AG_{16} 开始选择其它 Agent 进行二级电压协助控制,根据 Agent 协助选择原则的 1 和 2, AG_{16} 本来应该向同一电压控制区的 AVR 控制器 AG_{35} 发送协助请求,但 AG_{16} 根据对环境信息的判断,发现本区域内对 V_{15} 的电压支持必须通过线路 15 - 16,而此线路在前面已断线,故即使 AG_{35} 进行二级电压控制也没有任何作用。于是, AG_{16} 根据原则 3 开始选择与节点 15 电气距离最近的临近区域中的 Agent 进行电压支持,经过比较,在 7 s 时决定向电压控制区中的 STATCOM 控制器 AG_{14} 发出电压协助请求。9 s 时, AG_{14} 采取二级电压控制,但仍没有消除 V_{15} 电压越限。10 s 时 AG_{16} 根据原则 3 再次向电压控制区中的另一 AVR 控制器 AG_{32} 发出请求,12 s 时 AG_{32} 回应请求采取二级电压控制,在 14 s 左右成功消除了 V_{15} 的电压越限。仿真结果如图 4 所示。

从图中可以看出,本例中多 Agent 的协助调压过程比较复杂, Agent 具有较高的智能性,能随时感知周围环境信息的变化,并做出正确的决策来影响环境。通过两个电压控制区内的 3 个不同类型的电压控制器的协助控制成功消除了系统内节点的电压越限。

3 结语

本文基于多 Agent 的分布式控制系统,提出了系统故障情况下综合考虑多种类型 FACTS 电压控制器 (AVR, SVC, STATCOM) 的扩展二级电压协调

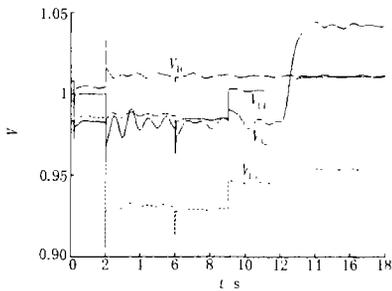


图 4 算例 2 的仿真结果

Fig 4 Simulation result of example No 2

控制。以装设 2 台 SVC, 2 台 STATCOM 和 10 台发电机 AVR 的新英格兰系统为例进行的数字仿真验证了多种系统紧急情况下该方案都能有效、快速地消除系统中的电压偏移。

在紧急情况下, 系统运行方式的改变往往伴随有网络结构的变化, 这时仅选择固定的电压分区不足以满足实时电压控制的需要。因此, 下一步的研究工作将考虑进行动态电压分区, 以更好对电压进行控制。

参考文献:

- [1] Paul J P, Leost J Y, Tesseron J M. Survey of the Secondary Voltage Control in France: Present Realization and Investigation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2 (2): 505-511.
- [2] Lefebvre H, Fragnier D, Boussion J Y, et al Secondary Coordinated Voltage Control System: Feedback of EDF [A]. IEEE/PES Summer Meeting Seattle (USA): 2000. 291-295.
- [3] Wang H F. Multi-agent Coordination for the Secondary Voltage Control in Power System Contingencies [J]. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib, 2001, 148 (1): 61-66.
- [4] 孙元章, 王志芳, 姚小寅. 电力系统二级电压控制的研究 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (9): 9-14.
SUN Yuan-zhang, WANG Zhi-fang, YAO Xiao-yin. Study on Secondary Voltage Control of Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (9): 9-14.
- [5] 盛戈皞, 涂光瑜, 罗毅, 等. 基于多 Agent 的二级电压控制系统 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (5): 20-25.
SHENG Ge-hao, TU Guang-yu, LUO Yi, et al Study on Mas-based Secondary Voltage Control System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (5): 20-25.
- [6] Yusof S B, Rogers G J, Alden R T H. Slow Coherency Based Network Partitioning Including Load Buses [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8 (3): 1375-1382.

收稿日期: 2005-10-13; 修回日期: 2005-12-27

作者简介:

张 晔 (1982 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为人工智能在电力系统中的应用; E-mail: zhangyelrr@163.com

李蓉蓉 (1981 -), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与故障诊断。

Multi-agent based extended secondary voltage coordinate control

ZHANG Ye, LI Rong-rong

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Based on the distributed principles of multi-agent system coordination, the extended secondary voltage control in system contingencies caused by a fault is investigated. The secondary voltage control involves different types of voltage controllers (AVR, SVC and STATCOM). A slow coherency method is used to decompose the whole system into several voltage control areas, after then the choosing principles of task-sharing for the coordination between electrically closely related agents are proposed. Therefore, the coordination mechanism between agents by communication is established. Demonstrated by the New England System (10 machines, 39 nodes) installed with two STATCOMs, two SVCs and ten generators'AVRs, the digital simulation results verify the validity and flexibility of the proposed control scheme.

Key words: multi-agent system (MAS); secondary voltage control; power system voltage control; SVC; STATCOM

(上接第 23 页 continued from page 23)

Abstract: This paper introduces a new fast protective relay, which responds the faults on full short and extra-short lines. Optic fiber is the medium of transmission channel which operated on FSK mode. Protection scheme is based on directional comparison with permissive overreach transfer tripping (POTT). This microprocessor based protective relay also includes the weak-feed transfer and self-tripping circuits for load or weak-feed end.

Key words: pilot protection; optic fiber channel; relay