

DOI: 10.7667/PSPC160444

基于 EMS 的分布式地县电网 AVC 控制策略

苏志朋¹, 宋铭敏¹, 汤大伟², 赵晓莉³

(1. 国网芜湖供电公司, 安徽 芜湖 241000; 2. 国网南陵县供电公司, 安徽 芜湖 241300;
3. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对地、县电网垂直耦合紧密, 县网规模较小, 提出一种新型分布式地县电网 AVC 控制策略。该策略基于 EMS 地县一体化自动化系统, 首先在地调、县调自动化系统中分别部署 AVC 应用, 地调和县调的 AVC 可运行在联调、解列两种模式下。其次建立分布式 AVC 系统优化控制模型, 并对优化目标函数引入计算因子, 使得该模型同时适用于地调 AVC 和县调 AVC, 简化了计算算法。最后现场运行效果表明, 该策略可实现从整个地区电网的角度进行区域电网无功优化, 进一步提高地调、县调电压合格率。

关键词: 电压自动控制; 电压质量; 网损; 电压稳定; 无功

Research on control strategy of distributed AVC for district grids based on EMS

SU Zhipeng¹, SONG Mingmin¹, TANG Dawei², ZHAO Xiaoli³

(1. State Grid Wuhu Power Supply Company, Wuhu 241000, China; 2. State Grid Nanling County Power Supply Company, Wuhu 241300, China; 3. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In view of power supply connection between the regional grids and smaller county grids, a novel distributed AVC system for district power networks is proposed. Firstly, a two-level AVC system is set up in the region and county power dispatch centers separately based on the integrated EMS both for regional wide and county wide grids. In this way, the two-level AVC system can run in the global mode or in the independent mode. Then the distributed AVC optimal control model is established, and the calculation factor is introduced in the objective function of the system, with which the calculation algorithm can be simplified. The optimal control model would be applied to the region and county AVC system at the same time. At last, the application in Wuhu grid shows that the system optimizes reactive power flow from the perspective of the whole region and improves the voltage qualification of the regional and county grids.

Key words: automatic voltage control; voltage quality; line loss; voltage stability; reactive power

0 引言

近年来,调度自动化 SCADA/EMS 系统的普及,“四遥”功能的成熟完善,推动了 AVC 系统在电网中的应用。目前 AVC 系统在电网中的覆盖率约为 30%~40%^[1]。国网芜湖供电公司地调 AVC 系统于 2010 年 10 月建设完成并投入使用,该系统为调度自动化 EMS 系统 PAS 应用中的一个模块。目前,芜湖地调所辖变电站 AVC 覆盖率 98%,月投运率在 95%以上。芜湖地调 AVC 系统长期闭环控制运行的实践表明,AVC 系统的应用提高了地区电网母线电压合格率,降低了输电网损。

芜湖电网下辖芜湖、繁昌、南陵、无为 4 个县供电公司。四县共管辖 43 座 35 kV 变电站,各县调

度自动化系统种类不一,自动化水平高低不同,且均未部署 AVC 系统,部分变电站电压合格率长期处于较低水平。尤其繁昌、无为 2 个工业县,其负荷和电量占芜湖地区比重较大,在峰值负荷时影响地区变电站电压水平;低谷负荷时,致使县网功率因素过高,造成无功潮流不合理。因此,县调亟需部署 AVC 系统以优化电压质量、减小网损。同时,也亟需一种将县网考虑在内,从全网角度进行无功电压控制的 AVC 控制策略,实现地区电网的电压稳定和无功优化。

1 国内 AVC 联调现状

目前,AVC 系统在省、地市电网已有较好的联调控制策略,在江苏、安徽和广东,已取得了一些

成功经验^[2]。省级电网根据各地区的无功备用容量和电压调节手段，通过优化计算，得到各变电站母线的最优运行电压值和无功值，并将此值以控制指令的形式下发给地调一侧，地调侧以此指令为控制目标，对所辖范围内的可控设备进行实时控制。此即为电压和无功的省地联调。但县公司电网结构规模相对较小，地县直接套用省地联调模式，部署成本较高，造成资源浪费，且地、县电网具有的垂直耦合紧密的特点，宜采取全网统筹优化。

文献[3]提出了一套地、县网 AVC 系统联合控制的分层协调控制方案，首先建立地网 AVC 系统优化模型，然后分别从功率因数调节和电压分层调压两个方面阐述了控制流程和控制策略。但该方案较为复杂，对子 AVC 系统要求过高，实现难度较大。文献[4]提出一套基于 AVC 电压目标值、OLTC 调节次数和电容器组投切次数约束构建 VQC 多目标优化决策模型。主要面向装设 VQC 系统的变电站，适用范围较窄。

2 基于EMS的分布式地县电网AVC系统结构

随着地县两级调度联系的加深、通信计算机技术的成熟，地县一体化调度自动化系统已成为智能电网的发展趋势，提高了自动化的可靠性，也节约设备资源，减少维护成本^[5-8]。目前，EMS 系统的地县一体化模式包括广域分布采集、远程终端和系统拼接 3 种模式。

远程终端模式仅在县调配置远程维护工作站，数据采集控制全在市调，县网电压控制由地调统一管理，不在本文讨论范围内。

广域分布采集模式在县调配置前置服务器及数据采集装置，以采集县辖变电站数据，然后统一上传至地调主系统统一分析处理并存储。且县调前置服务器在与地调主系统解列情况下，可暂时作为主系统独立运行，其结构如图 1 所示。

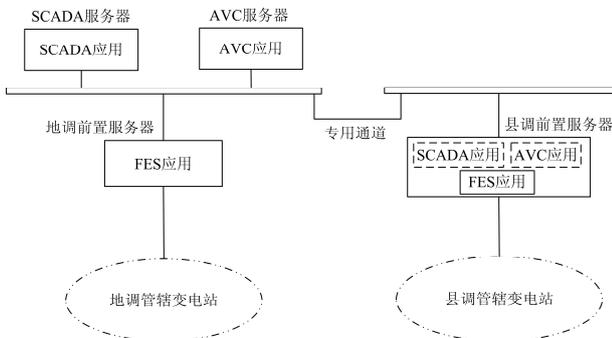


图 1 地县一体化自动化系统结构图

Fig. 1 Structure of EMS for prefecture-country grid program

系统拼接模式相当于在县调再配置一套规模相对较小的主系统，利用信息技术二者相互拼接，互为备用。EMS 系统地县一体化的推广应用，为地县电网 AVC 系统部署提供了技术支撑平台。

分布式地区电网 AVC 由分别部署在地调和县调自动化系统上的 AVC 应用模块构成，其结构如图 2 所示。AVC 系统通过 EMS 地县一体化系统获取电网信息，并实现控制命令下发。在正常运行时，亦即地县联调模式下，县调 AVC 应用处于闭锁状态，仅接受地调 AVC 应用的告警信息并显示，不参与无功控制中。各县调电网的无功优化由地调 AVC 应用统一控制，进而实现从整个地县电网的角度进行区域电网无功优化，全面改善和提高地县电网电压质量，同时作为地区电网与省调进行联调，实现全省电网无功优化。

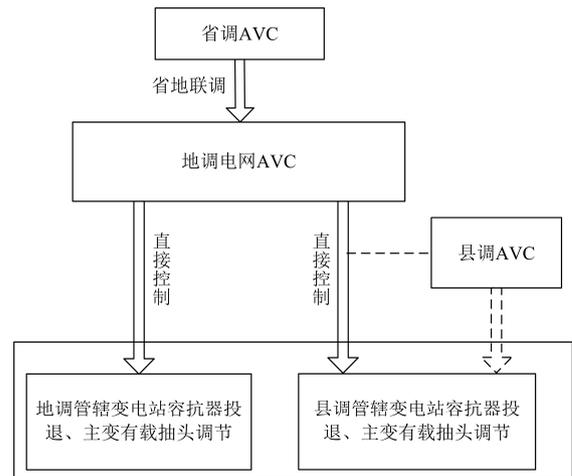


图 2 分布式地区电网 AVC 系统结构图

Fig. 2 Structure of distributed AVC system for district grid

在遇到特殊情况如地调系统故障、专用通道中断等需县调独立运行时，县调 AVC 应用与地调 AVC 应用自动解列运行。此时县调 AVC 应用由离线状态变为在线运行状态，县辖变电站从地调 AVC 优化范围内移除，并由县调 AVC 应用控制。对于拼接模式的 EMS 地县一体化系统，在解列模式下，县调仅需启动 AVC 应用即可。而对于广域分布采集模式，县调前置服务器中的 SCADA、AVC 应用需同时启用，自成一套独立的 EMS/AVC 系统，实现对下辖变电站监控并进行无功优化控制。

分布式地区电网 AVC 系统具有动态调整范围的特点。联调模式下，地调 AVC 对整个地县电网进行区域电网无功优化。解列模式下，地调、县调下辖各控制区域相互独立运行，互不影响，提高了

AVC 系统的可靠性。同时也可人工将一个或多个县网由地调 AVC 中解列出去而独立运行, 提高了 AVC 系统的灵活性。

3 分布式 AVC 优化控制策略

3.1 分布式 AVC 系统优化控制模型

常规 AVC 系统的优化目标以发电成本、网损最小、电压水平最优、无功补偿容量最小、管理成本最低等为最优目标^[9-10]。本文选取网损最小和电压水平最优作为优化目标, 具体目标函数为

$$\min F = \min \left\{ \lambda_1 \sum \alpha_i P_i + \lambda_2 \sum \beta_j (V_j - V_{js})^2 \right\} \quad (1)$$

式中: α_i 为有功损耗计算因子; P_i 为线路有功损耗; β_j 为电压计算因子; V_j 为量测实际电压; V_{js} 为电压基准值; λ_1 、 λ_2 为权重系数。

考虑到县调 AVC 可能与地调 AVC 解列运行, 地调 AVC 的优化范围将会发生变化, 本文在优化目标函数中引入计算因子。在联调模式下, 目标函数中优化参数的计算因子为 1, 参与优化控制。解列模式时, 将相应解列出去的优化参数计算因子置为 0, 目标函数不考虑对其进行优化。该目标函数同时适用于地调 AVC 和县调 AVC, 仅是二者的计算因子置数不同。

计算因子的引入, 将地调 AVC 系统与县调 AVC 系统的无功优化算法统一起来, 简化计算算法, 提高了目标函数的适用范围, 而且解列前后优化结果不会偏差较大, 造成分接头、电容器过度动作。

V_{js} 的取值为

$$V_{js} = \begin{cases} V_{j\max} & V_j \geq V_{j\max} \\ V_j & V_{j\min} < V_j < V_{j\max} \\ V_{j\min} & V_j \leq V_{j\min} \end{cases} \quad (2)$$

等式约束为系统的潮流方程和计算因子的置数:

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad \beta_j = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$P_i = V_i \sum V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$Q_i = V_i \sum V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

值得注意的是, 式中 α_i 和 β_j 在地调 AVC 和县调 AVC 的取值是相反的, 因为二者的控制范围为互斥关系。

不等式约束为

$$\begin{aligned} V_i^{\min} &\leq V_i \leq V_i^{\max} \\ |P_{ij}| &\leq P_{ij}^{\max} \\ Q_{ij} &\geq 0 \\ 0 &\leq \gamma_i \leq \gamma_{i\max} \\ \tau_i &\geq \tau_{i\min} \end{aligned} \quad (4)$$

以上不等式约束分别表示为节点电压幅值约束、线路潮流的约束、地调对省调不得出现无功回送的约束、无功控制时设备动作次数和动作时间间隔的约束。对于地市级电网, 可暂不考虑发电机出力的约束。

利用式(3)和式(4)给出的约束条件, 对目标函数式(1)进行迭代计算^[11-17], 求得 F 最小值下的电压无功控制方案, 可实现将县网考虑在内的联调模式和解列模式下全网无功优化和电压控制。实际运行结果表明对于地、县电网而言该迭代计算时间在接受范围内, 因为目前地、县电网的无功控制措施是变压器分接头控制和电容器投切, 且电容器多通过 10 kV 母线接入, 计算量较为简单。

3.2 控制流程

分布式地县电网 AVC 系统的控制流程如图 3 所示。在系统收到闭环控制命令后, 首先检查系统的运行方式。联调模式下, 县调 AVC 处于闭锁状态, 但仍参与到后续模型更新、获取约束条件、优化目标函数流程, 仅在控制命令下发时被闭锁, 保证了县调 AVC 实时更新。若是在解列模式下, 则启动县调 AVC 应用, 参与到无功优化控制中。

模型更新则是通过 EMS 系统获取全网数据信息。约束条件则包括上节的等式和不等式约束、变电站软闭锁和硬闭锁、相应运行模式下的计算因子。最后通过 SCADA/EMS 实现遥控命令的下发, 该无功优化控制流程图同时适用于地调、县调 AVC 系统, 主要差别在于获取的数据信息不同。

4 应用实例

国网芜湖供电公司于 2015 年 1 月完成下辖 4 县的地县一体化调度自动化系统项目, 系统采用广域分布采集模式。同期部署基于 EMS 的分布式地县电网 AVC 系统, 经过开环测试后于 2015 年 2 月正式闭环运行。经过几个月的现场应用, 取得了不错的运行效果, 现具体分析如下。

1) 提高电压合格率

为比较新 AVC 系统投运后对电压控制的影响, 本文选取 2015 年 2~11 月新 AVC 系统投运后母线电压合格率与 2014 年 2~11 月母线电压合格率相比较, 具体结果如表 1 所示。

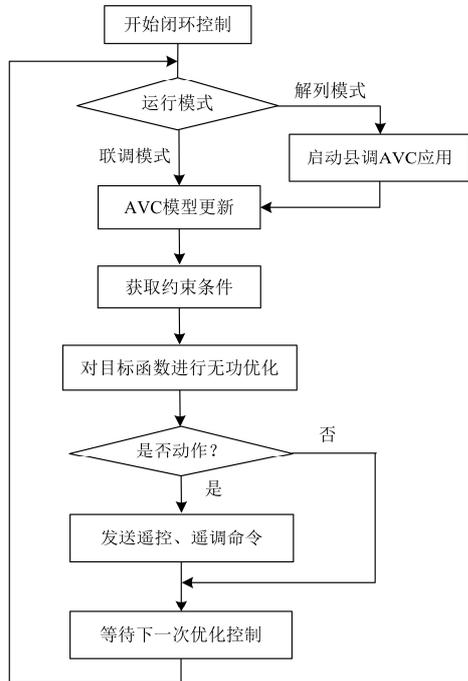


图3 分布式地县电网无功优化控制流程

Fig. 3 Flow chart of reactive power optimization in distributed AVC system

表1 AVC系统投运前后同期电压合格率对比

Table 1 Comparison of voltage qualification rate with or without distributed AVC system

所属区域	母线电压等级/kV	投运前合格率(%)	投运后合格率(%)	同比(%)
芜湖地区	220	98.15	98.83	0.69
	110	97.13	97.71	0.60
	35	97.37	98.45	1.11
	10	95.72	96.24	0.54
繁昌县	35	90.21	94.26	4.49
	10	89.57	94.17	5.14
无为县	35	91.09	95.36	4.69
	10	89.83	93.23	3.78
南陵县	35	92.17	94.63	2.67
	10	91.64	93.28	1.79
芜湖县	35	91.87	93.17	1.42
	10	91.03	93.09	2.26

由表1分析可发现,新AVC系统的投运后,相较于前一年同期,县网的母线电压合格率提升明显,最高提升近5.14%,平均提高2.43%。尤其是之前母线电压合格率较低的繁昌、无为两县的电压水平得到了很大的提升。而地区电网母线电压合格率有一定提高,但幅度不大。原因在于地市公司本身已部署AVC系统,电压合格率处于较高水平。AVC系统中县网的接入给市公司的主网电压控制带来一定的提高。

2) 降低网损

为比较新AVC系统投运后对全网线损(仅指地调所辖电网,不包括县网)的影响,本文选取2015年2~11月新AVC系统投运后全网线损率与2014年2~11月全网线损率相比较,如图4所示。

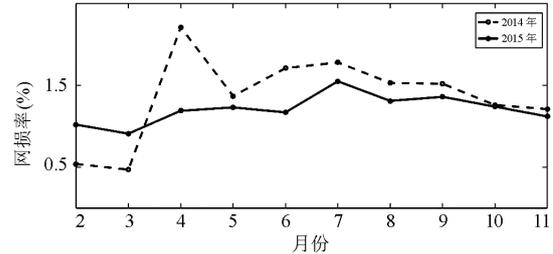


图4 AVC系统投运前后同期全网线损率对比

Fig. 4 Comparison of net loss rate with or without distributed AVC system

由图4可发现,将县网纳入优化范围的新AVC系统降低了全网线损率,平均线损率由1.36%降至1.2%。另外值得注意的是,全网线损率在新AVC系统投运后波动较为平缓,这也反映出了新AVC系统能够合理分配现有无功资源,为电网的经济运行提供可靠的技术支持。

3) 提高了AVC灵活性

系统在正式投运前,测试将4县AVC分别人工解列、模拟通信故障解列,结果表明县调AVC可按要求启动并实施无功优化控制。其中对无为县调解列运行1周,系统运行正常,相对去年同期35kV母线电压合格率由90.47%提高到94.19%,10kV母线电压合格率由89.16%提高到92.81%,效果明显。

5 结论

基于EMS的分布式地县电网AVC控制策略在地县一体化自动化系统的基础上,分别在地调、县调部署AVC,并对目标函数引入计算因子,使得该目标函数同时适用于地调AVC和县调AVC,简化了计算算法,保证了地调AVC和县调AVC联调或解列运行,提高了AVC系统的可靠性和灵活性。从而实现从整个地区电网的角度进行区域电网无功优化,全面改善、提高电网电压质量,优化无功潮流,降低网损,提高电压合格率。

参考文献

[1] 唐寅生,丁晓群. 智能AVC系统的特征和建设研究[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 10-14.
TANG Yinsheng, DING Xiaoqun. Research on features of smart AVC and its construction[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 10-14.

- [2] 李健, 刘明波, 陈文广. AVC 体系下的长期电压稳定仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 59-65.
LI Jian, LIU Mingbo, CHEN Wenguang. Long-term voltage stability simulation based on AVC framework[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 59-65.
- [3] 苏家祥, 廖亨利, 袁文谦, 等. 地、县两级电网 AVC 系统分层联合协调控制[J]. 继电器, 2008, 36(10): 36-39.
SU Jiayang, LIAO Hengli, YUAN Wenqian, et al. Multilayer united controlling by the region and county's AVC[J]. Relay, 2008, 36(10): 36-39.
- [4] 顾洁, 陈章潮, 张林. 基于遗传算法的无功优化模型研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(3): 10-12, 42.
GU Jie, CHEN Zhangchao, ZHANG Lin. Study on the model of reactive power optimization based on genetic algorithm in electric power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2001, 13(3): 10-12, 42.
- [5] 李乃湖. 计及整型控制变量的电压一无功功率优化[J]. 电力系统自动化, 1994, 18(12): 5-11.
LI Naihu. Optimal voltage-reactive power control with discrete variables[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(12): 5-11.
- [6] 钟毅, 陈蕊. 地区电网 AVC 系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 41-44.
ZHONG Yi, CHEN Rui. Design and realization of AVC system about area power system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 41-44.
- [7] 于汀, 蒲天骄, 刘广一, 等. 电网 AGC 与 AVC 协调控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 42-47.
YU Ting, PU Tianjiao, LIU Guangyi, et al. Coordinated control method of AGC and AVC in power grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 42-47.
- [8] 黄小庆, 曹阳, 吴卫良, 等. 考虑电压暂降指标的电压协调控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 147-154.
HUANG Xiaqing, CAO Yang, WU Weiliang, et al. Research on voltage coordination control method considering voltage sag index[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 147-154.
- [9] 王旭冉, 郭庆来, 孙宏斌, 等. 计及电动汽车充放电负荷的分布式电压稳定监控方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 43-49.
WANG Xunran, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Distributed voltage stability assessment and control considering electric vehicle charging and discharging load[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 43-49.
- [10] 张伯明, 孙宏斌, 邓佑满, 等. 面向地区电网的 EMS 应用软件[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(5): 40-44, 48.
ZHANG Boming, SUN Hongbin, DENG Youman, et al. Advanced application software package of EMS development sub-transmission power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(5): 40-44, 48.
- [11] 黄华, 高宗和, 戴则梅, 等. 基于控制模式的地区电网 AVC 系统设计及应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 77-80.
HUANG Hua, GAO Zonghe, DAI Zemei, et al. Design and application of AVC system for district power network based on control modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 77-80.
- [12] 王彬, 郭庆来, 周华锋, 等. 南方电网网省地三级自动电压协调控制系统研究及应用[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 208-215.
WANG Bin, GUO Qinglai, ZHOU Huafeng, et al. Application of coordinated automatic voltage control integrated for regional, provincial and prefectural control in china southern power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 208-215.
- [13] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 协调二级电压控制的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 19-24.
GUO Qinglai, SUN Hongbin, ZHANG Boming, et al. Study on coordinated secondary voltage control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 19-24.
- [14] SANCHAJ L, FERNANDEZ J L. Secondary voltage control: analysis, solutions and simulation results for the Spanish transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(2): 630-638.
- [15] 林瑞星, 杨洪耕, 惠锦. 改进新息图法在地区电网 AVC 系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 107-111.
LIN Ruixing, YANG Honggeng, HUI Jin. An improved method of innovation graph approach and its application in AVC system for regional power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 107-111.
- [16] LAGONOTTE P, SABONNADIÈRE J C, LEOST J Y, et al. Structural analysis of the electrical system: application to secondary voltage control in France[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(2): 479-486.
- [17] 林舜江, 刘明波, 徐达, 等. 广东电网电压调控安全评估系统的开发和在线应用[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3151-3158.
LIN Shunjiang, LIU Mingbo, XU Da, et al. Development and on-Line application of voltage control and security assessment system for Guangdong power grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3151-3158.

收稿日期: 2016-03-29; 修回日期: 2016-06-30

作者简介:

苏志朋 (1987-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 从事电力系统运行与控制研究工作; E-mail: allen_so@qq.com

宋铭敏 (1984-), 女, 本科, 技师, 从事电网调度自动化技术研究工作;

汤大伟 (1985-), 男, 本科, 技师, 从事电力系统运行与控制研究工作。

(编辑 周金梅)