

基于智能电网技术的无功电压控制方法

姚昊洋, 谢琼涛, 盖志武

(海南师范大学物理与电子工程学院, 海南 海口 571158)

[摘要] 针对目前国内部分地区的电网无功电压控制方法相对落后, 区域电网之间的相互协调能力较弱, 导致电力系统控制电压的效果不佳的问题, 重新设计了区域电力系统的无功电压控制方案, 提出了区域电网分级控制电压的方法, 可以实现对特定区域电网无功电压的控制优化. 在电压控制系统(AVC)的基础上建立了相应的电力系统调度模型, 得到平均协调功率因数的最小限值和电力系统负荷水平和平均协调功率因数的变化曲线, 验证了电力系统中的智能电网自动电压控制技术的有效性, 验证结果表明, 对于区域电网无功电压的控制, 本文所提出的控制方法具有实际可行性.

[关键词] 智能电网, 电力系统, 自动电压控制, 无功电压控制

[中图分类号] TM762 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2020)04-0009-05

Reactive Voltage Control Method Based on Smart Grid Technology

Yao Haoyang, Xie Qiongtao, Gai Zhiwu

(Department of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou 571158, China)

Abstract: Since on the current power grid reactive voltage control method in some parts of the country is relatively backward, the interaction between the regional power grid ability is weak, and there is the problem of poor performance of power system voltage control. We redesigned the reactive voltage control scheme of the regional power system and put forward the hierarchical control regional power grid voltage method, which can realize control of the specific regional power grid reactive voltage optimization. Based on automatic voltage control(AVC) system, the power system scheduling model is constructed. An average coordination was used to solve the minimum limit of power factor, the power system load level with the average coordinates the relationship between the change of the power factor. The optimization algorithm of electric net loss minimum proved the validation of the smart grid in the power system automatic voltage control technology. The effectiveness of the verification results show that for the regional power grid reactive voltage control, the proposed control method has high control effect.

Key words: smart grid, power system, automatic voltage control(AVC), reactive voltage control

随着我国经济水平的不断提高, 智能电网在我国电力系统中得到了很快的应用和发展, 将智能电网与电力系统深度融合将不断促进我国电力行业的智能化建设, 这既可以满足人们的日常用电需求, 更可以显著提高我国电力系统自动化控制水平. 智能电网在控制电力系统安全稳定运行方面具有十分显著的优势, 值得对其进行深入的研究分析^[1-4].

在“大数据”以及“云计算”等技术的支持下, 智能电网技术能够有效地对信息进行管理. 在电力系统运行时, 大量繁杂的数据需要进行处理, 而智能电网的应用可以对数据信息进行归类整理, 使得电力系统中的数据信息得到有效的管理, 从而保证了电力系统的主要环节具有智能化, 有助于提高电力系统的工作效率. 智能电网技术能够实时监控电力系统的各项指标, 并实时对电力系统进行故障排查, 一旦有异常情况便会将信息传送至监测中心, 这将促使电力系统的智能化水平不断提高^[5-8].

当前, 随着我国电力覆盖率的不断提高, 电力系统的规模也逐渐扩大, 如何加强电力系统稳定性, 保证其持续安全运行就成为亟待解决的问题. 智能电网便是针对上述问题提出的一种解决方案, 智能电网通

收稿日期: 2019-11-15.

基金项目: 海南省自然科学基金项目(20165198).

通讯作者: 盖志武, 教授, 研究方向: 电气自动化、电磁场理论. E-mail: hnsf11@qq.com

过将信息数据技术与电力系统基础设施相融合,可以应用大数据、控制技术等实时对电力系统进行检测,预防外界因素对电网的干扰,使电力系统具有自我分析、判断和控制的能力,以显著增强电力系统的智能水平. 从目前来看,智能电网在电力系统中的应用越发广泛,因此有必要对其进行深入的研究和分析^[9-13].

自动电压控制(automatic voltage control,AVC)作为智能电网的核心技术之一,可以对电力系统的无功电压实时进行控制,可以使电力系统的主管关电压水平保持在稳定状态,从而实现对主网关口的电压控制^[14-16]. 由于 AVC 技术的安全性较高,所以已在国内外大规模应用. 然而,现在我国大部分地区对无功电压的控制一般是通过就地平衡的控制方法,这种方法难以使得相邻地区的电网做到很好地相互协调^[17]. 从省级电网的层面来看,还未实现较好地控制电力系统电压^[18]. 由此来看,对无功电压的进行控制对电网的安全运行具有十分重要的意义,尚需对其进一步的探讨.

1 电力系统调度模型

1.1 自动电压控制

如图 1 所,在自动电压控制中,发电厂、变电站以及调度中心主要基于无功电压优化、策略运算和发布指令等主要核心部分进行对电网的电压控制.

自动电压控制主要分为开环和闭环控制,开环模式中,模块运算得到的控制策略可以供工作人员参考. 在闭环模式下,系统将自动进行控制,完成闭环反馈. 另外,在 AVC 模块处于调试阶段的时期还可半闭环控制,即控制策略的执行要经过工作人员的确认^[19].

1.2 自动电压控制系统的原理

对调度中心主站和 AVC 模块进行统筹规划,相应的 AVC 系统设计原理见图 2. 由监控和数据采集系统(SCADA)发送实时数据,电力系统无功电压控制部分进行实时在线计算,然后反馈到监控和数据采集系统(SCADA)由其发送控制指令,完成对电力系统无功电压控制的优化^[20]. 根据电压等级及电力系统的结构,AVC 系统可进行相应的分层. 根据数据库模型(DM)的信息,ACV 系统可以对控制设备和厂站进行定级,并且可以建立相互之间的交互网.

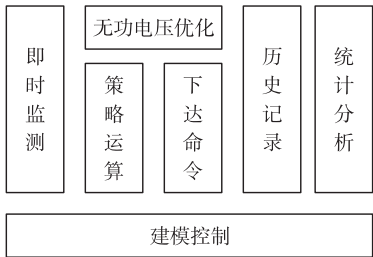


图 1 电压自动控制(AVC)的构成
Fig. 1 Constitution of AVC

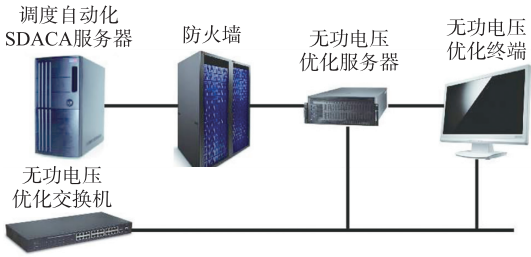


图 2 AVC 系统工作原理图
Fig. 2 Schematic layout of AVC systems

1.3 电力系统调度算法

我国省级电网一般用 500 kV 电压,地级电网采用 220 kV 及以下电压,省级电网和地级电网之间的接线方式见图 3.

通过设定等式和不等式约束条件,采用一维优化方法可以求得省级电网与地级电网上层关口的平均协调功率因数的最小限度值 $\cos \theta_a$.

$$\min \cos \theta = \cos \theta_a, \tag{1}$$

$$\text{s.t. } H(Q_{500_G}, T_{500_K}, Q_{500_C}) = 0, \tag{2}$$

$$\begin{cases} Q_{500_GL} \leq Q_{500_G} \leq Q_{500_CH}, \\ T_{500_KL} \leq T_{500_K} \leq T_{500_KH}, \\ Q_{500_CL} \leq Q_{500_C} \leq Q_{500_CH}, \\ Q_{500_BL} \leq Q_{500_B} \leq Q_{500_BH}, \\ Q_{500_ZL} \leq Q_{500_Z} \leq Q_{500_ZH}. \end{cases} \tag{3}$$

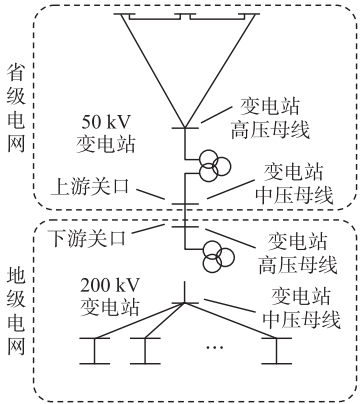


图 3 省级电网与地级电网接线模型
Fig. 3 Provincial grid and ground-level grid wiring model

式(2)中, $H(\cdot)$ 表示等式约束条件, Q_{500_G} 、 T_{500_K} 、 Q_{500_C} 表示控制变量, Q_{500_G} 为500 kV电网的并网发电机输出的无功功率向量, T_{500_K} 为500 kV变压器抽头档位的向量, Q_{500_C} 为500 kV变压器进行无功补偿所设置的向量, U_{500_B} 和 Q_{500_Z} 表示状态变量, U_{500_B} 为省级电网与地级电网中枢母线节点的电压幅值变量, Q_{500_Z} 为虚拟电源无调节输出的无功功率向量.500 kV等级电网以下标500表示,对照参数的最小限定值用下标 L 表示,对照参数的最大限定值用下标 H 表示.

上层电网的无功承受极限以及电力系统的无功特性一般随负荷变化也会发生改变,在对省级电网的平均协调功率因数的最小限定值 $\cos \theta_a$ 进行计算时,必须考虑负荷水平状态的影响.为了得到在各种负荷水平状态下省级电网对地级电网的无功负荷性能最大限定值,可以实时对500 kV变电站中压侧对下一级的地级电网传递的总有功出力 P_0 进行监测,从而可以画出 $P_0 - \cos \theta_a$ 特性曲线.图4即为某省级电网的 $P_0 - \cos \theta_a$ 特性曲线图.

由图4可知各种负荷下的平均协调功率因数限定值和无功负荷性能最大极限值.对于500 kV变电站中压侧的有功出力,可以在电力系统运行时进行实时监测,然后求和得到总有功出力,根据得到的 $P_0 - \cos \theta_a$ 特性曲线,可以实时控制自动电压控制系统使其输出与之相匹配的关口平均协调功率因数.

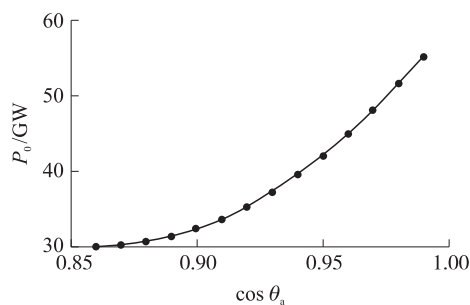


图4 特性曲线图

Fig. 4 Feature graph

2 分级电压控制

分级电压的控制应将其分解为不同的控制部分,一般是通过三级电压进行控制,具体的来说就是实时更新中枢母线电压的设定值.二级电压主要由于获取中枢电压的实时幅值,通过求解该实时幅值与数据限值的差,然后将差值作为输入值来控制中枢母线电压幅值,从而使其趋于稳定^[21].

2.1 二级电压控制

针对二级电压的控制,根据协调平衡控制理论,构建所求函数的二次规划形式如下所示:

$$\min_{\Delta Q_p} \begin{cases} K_1 \|\alpha \Delta U_p + C_p \Delta Q_p\|^2 \\ + K_2 \left\| \frac{Q_p + \Delta Q_p - Q_{p_{\max}}}{Q_{p_{\max}} - Q_{p_{\min}}} \right\| \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{s.t. } |C_{pg} \Delta Q_p| \leq \Delta U_{H_{\max}}, \quad (5)$$

$$U_{H_{\min}} \leq U_H + C_{pg} \Delta Q_p \leq U_{H_{\max}}, \quad (6)$$

$$U_{p_{\min}} \leq U_p + C_p \Delta Q_p \leq U_{p_{\max}}, \quad (7)$$

$$Q_{p_{\min}} \leq Q_g + \Delta Q_g \leq Q_{p_{\max}}. \quad (8)$$

式中, α 表示增益系数, K_1 和 K_2 为加权系数,是控制参数, ΔQ_p 为中枢母线即时电压幅值, U_p 是中枢母线电压偏差值, ΔU_p 表示中枢母线电压最小设定值, $U_{p_{\max}}$ 表示中枢母线最大设定值, Q_p 为发电机瞬时无功出力, $Q_{p_{\min}}$ 和 $Q_{p_{\max}}$ 为发电机无功出力的最小限定值和最大限定值, U_H 为发电机高压侧母线即时电压幅值, $U_{H_{\min}}$ 表示发电机高压侧母线电压最小极值, $U_{H_{\max}}$ 表示发电机高压侧母线电压最大极值, $\Delta U_{H_{\max}}$ 表示单步最大调整值, C_p 和 D_{pg} 为敏感度调节矩阵,具有如下的关系:

$$\begin{cases} \Delta U_p = C_p \Delta Q_p, \\ \Delta U_H = C_{pg} \Delta Q_p. \end{cases} \quad (9)$$

所求函数必须满足以下两个要求:

(1) 中枢母线电压幅值和设定的恒定值两者之间的误差较小;(2) 各发电机组之间的输出功率处于平衡协调的状态,使剩余功率可以输出无功功率.

二级电压控制主要分为信号获取、滤波、决策、执行等部分.在信号采集过程中,为了降低状态评估误差,信号采集时可以从监控和数据采集系统(SCADA)中进行调用.滤波单元的主要作用是剔除误差较大的采样数据,避免错误信息传递至控制单元.决策部分可以基于中枢母线电压的实时幅值和设定值之间的误差进行反馈控制.

2.2 三级电压控制

三级电压控制模块将设定好的中枢母线电压理想值发送至二级电压控制模块,二级电压控制模块再对接收到的信息进行决策分析.三级电压控制模块的功能主要是优化电力系统的经济性^[22-25].本文主要考虑对电网损耗进行优化,其三级电压控制相关数学表达式如下:

$$\min f = P_{\text{loss}} = \sum_{(i,j) \in A_{NL}} (P_{ij} + P_{ji}), \quad (10)$$

式中, A_{NL} 表示支路集合, P_{loss} 表示损耗的有功功率.

相关约束条件有:

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} = U_i \cdot (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}), \\ jQ_{Gi} - Q_{Di} = U_i \sum_{j \in I} U_j \cdot (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}), \\ j \in A_{NB}, \theta_A = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, P 为有功出力, G 表示电导, B 表示电纳, 表示节点集合, Q 表示无功出力.

3 工程验证结果与讨论

为了验证本文所设计的自动电压控制系统可以实现对中枢母线电压的控制,以该自动电压控制系统为对象,进行了实际的应用场景测试.本文选取某地区的一处 220 kV 变电站作为实际应用测试点,将所设计的自动电压控制系统应用于变电站的实际运行过程中.对变电站不同日期的同一时段中枢母线电压进行监测,监测时间设定为 12:00—22:00.将监测到的变电站中枢电压信号经过 PC 端 Matlab 处理后,然后通过绘图工具做出相应的曲线图.某地区 220 kV 变电站的采用自动电压控制前后的中枢电压幅值变化如图 5 所示.

由图 5 可以得知,当未使用自动电压控制系统时,由于无功电压的控制不够灵敏,随着负荷水平的变化,中枢母线电压的波动较大,信号波峰与波谷差距显著.由 Matlab 数据统计结果可知,在使用自动电压控制系统之前,中枢母线电压峰值为 236.78 kV,中枢电压最低值为 232.14 kV,峰值电压与最低值电压的差值为 4.64 kV.当采用自动电压控制系统后可以看出,中枢母线电压的振荡现象明显减弱,峰值电压为 235.13 kV,最低值电压为 233.89 kV,峰值电压和最低值电压的差值为 1.24 kV,中枢母线电压的最大值和最小值之间的差值有所减小,并且中枢母线电压一直在 234.43 kV 上下波动,信号的波动范围较小,表明无功电压的控制效果较好.由此可见,采用自动电压控制系统后,中枢母线电压信号的波形稳定性更高.以上结果表明,自动电压控制系统能够实现对电网电压的有效控制.

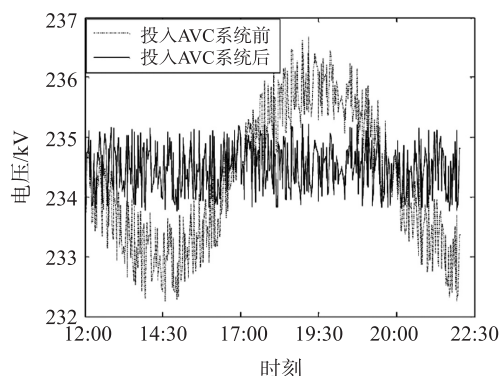


图 5 使用 AVC 系统前后的中枢母线电压对比

Fig. 5 Central bus voltage comparison before and after using AVC system

4 结论

基于电力系统的无功电压分析与辨识,采用分级控制的方法,设计了一种可以自动控制无功电压的控制系统.为了降低电网的损耗,在自动电压控制系统的基础上构建电力系统调度模型.工程验证实验表明:

(1) 基于自动电压控制系统可以建立电力系统调度模型,通过设定相关的等式和不等式约束条件计算平均协调功率因数的限定值,实现对各种负荷水平下的无功负荷特性进行求解和分析.

(2) 提出的分级电压控制的数学模型,可以实现对特定区域电网无功电压的控制优化.

(3) 自动电压控制系统可以实现对电网电压的有效控制,对于电网的损耗有一定的优化作用,可以改善电力系统的运行稳定性.

[参考文献]

- [1] 张勇军,林建熙,杨银国. 电力系统无功电压调控配合研究综述[J]. 电网技术,2012,36(3):101-106.
- [2] GRAFF R. Real time application of an optimal power flow algorithm for reactive power allocation of the RWE energy control center[C]//London,UK:IEEE Colloquium on International Practices in Reactive Power Control,2010.
- [3] DENZEL D,EDWIN K W,GRAF F R,et al. Optimal power flow and its real-time application at the RWE energy control centre[C]//Paris,France:International Council on Large Electric Systems,2012.
- [4] 王景辉. GIS技术在县域电网规划中的应用[J]. 电子科技,2013,26(8):124-125.
- [5] 张胜天. 基于软分区的全局电压优化控制系统设计[J]. 电力系统自动化,2014,27(8):16-20.
- [6] 周金辉,骆宗义,王子凌,等. 考虑AVC的含分布式光伏园区配电网无功电压控制仿真[J]. 浙江电力,2018,37(10):19-24.
- [7] 郭庆来,王蓓,宁文元,等. 华北电网自动电压控制与静态电压稳定预警系统应用[J]. 电力系统自动化,2008,32(5):95-98.
- [8] 范心明,彭飞进,伍肇龙,等. 基于混合整数凸规划的主动配电网无功电压优化运行方法[J]. 电力电容器与无功补偿,2018,39(4):99-105.
- [9] 赖旬阳,吕旭军,郑彧,等. 基于PI调节器的电力系统二级电压控制动态仿真[J]. 浙江电力,2018,37(4):50-56.
- [10] 张勇军,张锡填,苏杰和. 基于AVC系统的省地电网关口无功功率协调控制方法[J]. 电网技术,2013,37(10):2771-2777.
- [11] 温柏坚,袁康龙,林舜江,等. 变电站电压无功控制对静态电压稳定的影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2013(7):103-108.
- [12] 丁晓群,周玲,陈光宇. 电网自动电压控制(AVC)技术及案例分析[M]. 北京:机械工业出版社,2010.
- [13] 唐永红,张蓓路,轶兰强. 基于双闭环控制策略的AVC控制效果互动评估开发与应用[J]. 电力电容器与无功补偿,2017,38(4):152-157.
- [14] 毛建忠,刘勇,陈海滨. 基于AVC的电网变电自动控制系统设计[J]. 自动化与仪器仪表,2018(12):126-128.
- [15] 杨晓雷,金山红,唐昕,等. 省地县三级AVC系统协调控制及实现[J]. 电网与清洁能源,2015(2):39-42.
- [16] 彭飞进,李绥荣,李响,等. 考虑SVG的地区AVC系统协调控制方法的分析[J]. 自动化与仪器仪表,2017(4):20-24.
- [17] 戴志辉,张程,刘宁宁,等. 基于反行波差值的特高压直流线路纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(21):1-10.
- [18] 于洋,孙学锋,高鹏,等. 高压直流输电线路暂态保护分析与展望[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(2):148-154.
- [19] 魏德华,苗世洪,刘子文,等. 基于边界特征的高压直流输电长线路故障判别方法[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(17):75-82.
- [20] 许小雪,刘建锋,江玉蓉. 基于多频带能量的高压直流输电线路单端暂态电流保护[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(22):32-39.
- [21] 董润楠,刘石,梁庚,等. 基于模型预测控制的微电网逆变器控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(21):11-20.
- [22] 陆玉玉,王波,王晓飞,等. 考虑公平性的智能电网实时电价收益均衡模型[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(21):41-46.
- [23] 王树东,杜巍,林莉,等. 基于合作博弈的需求侧响应下光储微电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(1):129-137.
- [24] 李姚旺,苗世洪,刘君瑶,等. 考虑需求响应不确定性的光伏微电网储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(20):69-77.
- [25] 王闪闪,赵晋斌,毛玲,等. 基于电动汽车移动储能特性的直流微网控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(20):31-38.

[责任编辑:顾晓天]