

# 电力系统电压/无功控制策略研究综述

余涛, 周斌

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 针对近年来国内外典型的电压/无功控制策略进行总结与评述, 如九区图法、五区图法和模糊控制、专家系统、神经网络等智能优化控制方法, 全面分析比较了其设计思想、调节判据及各自的优缺点; 并结合电力系统通信、电压稳定性、自动电压控制技术的最新发展, 就电压无功控制最新成果进行了综述; 最后对未来电压无功控制在电网运行中有待于研究的问题提出了几点展望。

**关键词:** 电压无功控制; 九区图控制; 自动电压控制; 智能控制; 控制策略

## A survey on voltage/reactive power control strategy for power systems

YU Tao, ZHOU Bin

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In the paper, the classical voltage/reactive power control (VQC) strategy are concluded and discussed, such as nine-area theory, five-zone theory and intelligent optimal control strategy including fuzzy control, expert system, neural networks and so on. Their fundamental ideals, regulating criteria, advantages and disadvantages are analyzed and compared. The prospect of VQC is also brought forward in terms of electric power communication, voltage stability and AVC. Finally, some opinions of the awaiting research of VQC in electric network operation are brought out.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 06300091).

**Key words:** voltage/reactive power control; nine-area control; automatic voltage control; intelligent control; control strategy

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)06-0079-07

## 0 引言

保证频率和电压的稳定是电力系统最基本的控制目标。由于高压输电系统具有  $X/R$  高比值的特点, 频率/有功功率和电压/无功功率通常可以解耦来考虑。对于大区电网和省网, 对于频率/有功功率控制采用自动发电控制(AGC), 对于电压/无功功率则采用自动电压控制(AVC)。但对于大多数地区电网调度而言, 电网频率控制一般不作为其主要职责, 而电压/无功控制(VQC)则作为其主要任务而倍受重视。

电压/无功控制主要是采用有载调压变压器分接头和并联补偿电容器组的投切来实现调节电压合格和无功平衡的目的。VQC 的控制策略是决定其控制性能的关键因素。自 70 年代研究 VQC 装置以来, 国内外已形成了一整套比较成熟的控制策略<sup>[1-3]</sup>。近年

来, 电力系统信号采集和处理技术、高速通信技术和卫星同步授时技术的迅速发展<sup>[4]</sup>, 为区域电网电压与无功的多级分层与分区协调控制奠定了物质条件<sup>[5]</sup>。国外一些著名的电力公司, 如法国电力公司(EDF)实现了无功功率及电压的区域性集中控制, 全系统各节点电压得到全面协调; 意大利国家电力系统(ENEL)也已实现在线分层控制结构的自动控制系统, 在整个超高压电网中普遍实现了二次和三次电压调整。

本文在综合比较大量 VQC 控制策略与相关文献的基础上, 分析阐述了其中各策略原理的调节判据、应用特点及各自的局限性, 并且进一步探讨了该课题今后的发展趋势和有待于研究的问题。

## 1 基于控制区域划分的控制策略

早期 VQC 策略大多是针对电压、功率因数等单一的控制策略。根据母线电压和无功输送功率构成的状态运行空间与控制输出的对应关系, 按区域来进行控制调节是最为常见的一类控制策略。

基金项目: 广东省自然科学基金项目(06300091)

### 1.1 传统九区图策略及其改进策略

九区图法是最早被应用到 VQC 的一种控制策略。基于“井”字形的典型九区图策略，如图 1 所示，是通过实时监测变压器低压侧母线电压和变压器高压侧无功功率(或功率因数)，并以此作为控制状态量，根据其工作点在各运行区间的对应逻辑关系，得出调节分接头和投切电容器的控制指令。

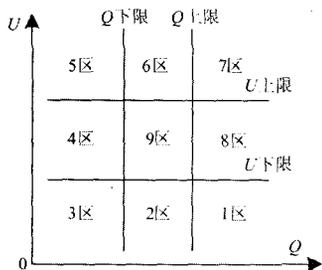


图 1 “九区图”示意图  
Fig.1 Diagram of “nine-area theory”

传统的九区图法的区域定义过宽，无法有效满足控制系统对负荷变化的有效连续调节的需要。为解决这个问题，并考虑并联电容器的电压特性，文献[6]在九区图的四个区域边界作进一步的划分形成十三区图，如图 2 所示。文献[7]在十三区图基础上对各区域边界控制上进行了更为细致的划分得到十七区图，如图 3 所示。考虑到 VQC 在调压时对高压侧母线电压(即系统电压)的影响，文献[8]中由高压侧电压、中压侧电压、高压侧无功功率上下限构成一个立体的控制区间图；控制策略通常是当高压侧电压不合格时，不考虑无功因素，以高压侧电压调整合格为目标；在高压侧合格的条件下，再进入常规的中压侧电压、高压侧无功形成的九区图控制，即双九区图。这种双九区图控制策略区分了高压侧电压正常和越限两种情况，能在不降低 VQC 的控制效果的条件下，有效提高变压器分接头使用寿命。

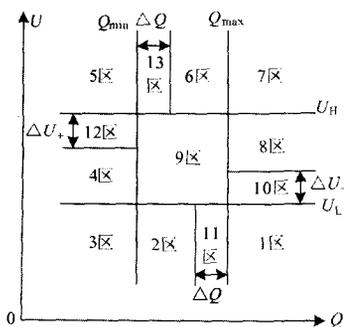


图 2 “十三区图”示意图  
Fig.2 Diagram of “thirteen-area theory”

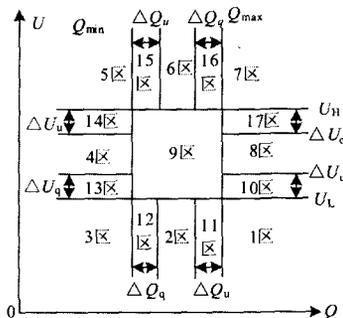


图 3 “十七区图”示意图  
Fig.3 Diagram of “seventeen-area theory”

由于控制边界固定，无论是传统的九区图还是其改进控制策略，当工作点跨越边界时均不同程度存在类似变结构控制的“抖动问题”，而变压器抽头调节和电容器组投切次数则有严格限制，因此九区图控制策略在实际运行时也存在所谓的“振荡动作”或误动作等问题。

### 1.2 面向操作动作的五区图策略

为保证装置动作的准确可靠，文献[9]提出了一种直接以装置动作为控制对象、以操作性质不同来划分区域的控制思想，基本思路是将 VQC 操作分为五种最基本的控制行为：不动作、升、降变压器档位、投、退电容，相应的引入 5 个动作矢量，通过对每个运行状态进行操作优劣距离比较，同时兼顾闭锁约束条件的限制以及采取电容操作优先等原则，选择最优的一个作为操作执行命令，由此 5 种动作矢量在 U-Q 控制平面上得到五区图原理<sup>[10]</sup>，如图 4 所示。

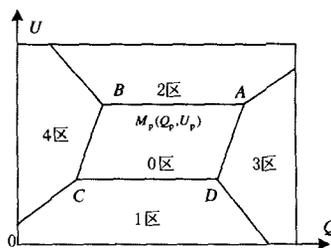


图 4 “五区图”示意图  
Fig.4 Diagram of “five-zone theory”

文献[11]以 110 kV 变电站为算例采用五区图策略实施最优调节，可以看到，五区图有动作逻辑划分清晰、动作选择合理、软件实现简易以及面向未来硬件等特点，将会使电压无功控制问题得到更为细致的解决，但其投(切)电容对电压的影响被简单地描述成一次曲线，若采用更高精度的曲线描述，

效果会更加明显。

## 2 基于人工智能的控制策略

VQC 是一个多变量、强耦合、非线性、控制规律难以用精确的数学模型来描述的复杂控制问题,其控制规律受系统时变性、运行条件和网络参数变化等多因素的影响,因此不依赖于精确数学模型的人工智能控制被大量引入到 VQC 中来。

### 2.1 模糊控制

根据模糊数学的概念建立数学模型,采用模糊控制条件语句来表达人们的经验以模仿人类的思维能力,主要依赖于模糊控制规则和模糊变量的隶属度函数,无须知道输入输出之间的数学依存关系,常用的模糊推理方法有 Zadeh 法、Mamdani 法、Larson 法和 Sugeno 法等。

传统九区图基础上引入模糊理论,文献[12]给出模糊边界的无功调节判据,该判据将电压状态引入无功调节特性,获得无功上下限是与电压状态有关的两条斜线。该判据在保持无功补偿效果与调节次数不变情况下,有效地减少分接头调节次数且延长了分接头使用寿命并提高了电压质量。

结合现场变电站控制的实际要求,人们对模糊控制系统添加一些功能加以完善,文献[13]考虑现场电容器投切操作时的瞬时冲击无功问题,在模糊控制器中融入了短期负荷预测和反时限延迟功能;文献[14]在控制中增加了操作禁止回退功能以消除并联电容器开关的往复投切现象;文献[15]中具有自辨识功能 VQC 装置能有效地保障发电机组自身的安全和运行的稳定性。另外,其他的一些现代数学方法和模糊理论相结合,如动态规划、自适应灰色理论、遗传算法等,形成了新型的混合模糊优化控制方法,来增强 VQC 控制系统的自我调节能力与自学习能力<sup>[16-19]</sup>。

然而,模糊控制最大的缺陷在于模糊规则的获取及调整不够灵活可靠,控制规则的获取和确定是模糊控制系统的核心,但缺乏系统化的设计方法,模糊规则一般由操作人员或专家的经验获得,没有充分利用样本数据的特征,具有较强的主观性,这在一定程度上影响和限制了模糊控制的效果与应用。

### 2.2 专家系统控制

专家系统实质上是一种具有大量专门知识与经验的智能计算机系统,基本结构可分为知识库、数据库、推理机、咨询解释、知识获取和人机接口六部分,其中知识库和推理机是系统的核心部分。

文献[20]通过模拟人类专家解决实际问题的过

程,综合了离线/在线数据及全系统变电运行专家知识和经验,设计了合理的 VQC 控制策略。文献[21]以运行状态辨识及专家经验为知识库,将统计法用于推理策略,由于将知识库与数据处理的推理机两部分区分开来,对知识的修改或删减并不影响推理的过程,而且随 VQC 自动调节次数增加,知识库能够在运行过程中不断地学习而加以完善。

但是专家系统严重依赖于专家知识的准确性,在知识集不足以覆盖电网的各种运行方式时,可能会做出错误的控制策略;此外,对于大型变电站来说,运行方式变化多和控制措施复杂,且需要考虑各种现场闭锁的要求,因此许多已有的专家系统用于在线或离线解决系统分析方面的问题,对于满足各种条件下的实时性控制要求仍存在较高的难度。

### 2.3 神经网络控制

人工神经网络(ANN)模型是模仿大脑神经网络结构和功能而建立的信息处理系统,具有并行处理快速、联想记忆能力强和容错率高等特点。目前研究和应用最多的神经网络模型有误差反向传播(BP)模型、Hopfield 离散和连续模型、径向基函数网络(RBF)模型等各具特色的模型与算法。

文献[22]提出一种基于人工神经网络的无功预测和优化决策相结合的电压和无功综合控制策略。该策略的有效性在于预测指导,将变压器分接头的调节次数降低到最少。文献[23]和文献[24]将神经网络配合模糊动态规划,先离线设计一个人工神经网络以小时为间隔来得到电容器和分接头的预先控制方案,然后利用模糊动态规划进行加工改进从而得到最终的控制策略。文献[25]引入 Hamming 网络对变电站运行区间进行分区判断来调动相应的控制策略,实践表明运行效果良好。

但基于 ANN 的控制策略设计需要大量的历史数据(训练样本)来完善权值,样本的丰富有利于提高 ANN 控制的性能,但却会降低在线学习的实时性;而电力系统的结构或运行方式经常处于变化之中,如何有效地选择特征样本和快速自学习 ANN 模型是一个需要重点攻关的内容。

## 3 最新发展方向

### 3.1 微机电压无功控制装置(AVQC)

目前,国内广泛应用与研究的变电站 VQC 装置都是以微型计算机为核心来实现智能控制的 AVQC 装置。AVQC 装置即是一个多输入多输出的闭环自动控制系统,微机通过 SCADA 系统将电压和电流互感器的二次值及有关一、二次设备的运行信息输入装置,快速准确实时跟踪变电站运行方式

的变化,分析判断并考虑保护动作、人工闭锁等限制条件下确定对电压无功设备控制的最优次序和组合<sup>[26]</sup>。东京电力系统在主要变电所内装设了微机电压及无功功率控制器,能快速准确地投切并联无功补偿设备和有载切换变压分接开关,保证了 500 kV 及二次电网的电压水平和提高电压稳定性。

AVQC 装置具有体积小、功能强大、灵活可靠等一系列优点,因而受到普遍欢迎。文献[27]将蓝牙技术应用于 AVQC 装置中,实现了自动装置的蓝牙无线改造,提高了装置的网络通信能力及操作的灵活性,增强了各装置之间相互配合能力。

### 3.2 考虑电压稳定性的改进 VQC 策略

重载时,VQC 装置在受到扰动后对有载调压变压器分接头的调整可能会带来“负调压效应”甚至引起电压失稳;同时负荷固有的非线性动态特性所产生的恢复功率常常不利于系统电压稳定性<sup>[28]</sup>。文献[29]从负荷特性、有载调压分接头(OLTC)以及发电机过励磁限制(OEL)三方面详细论述了其共同作用造成电压失稳的可能性。特别当系统运行于电压稳定边缘状态时,VQC 动作更应谨慎。

目前,国内外电力界推荐的解决方法是借助广域测量系统(WAMS)和宽域网(WAN)来对 VQC 实行改进<sup>[30]</sup>。WAMS 可看作系统稳态过程中传统 SCADA 系统的延伸,核心思想是高精度(微秒级)同步采集广域电网的实时运行参数——相量,借助高速通信网络将分散的相量数据集中起来得到时空坐标下电网全局的动态信息。结合 WANS 辅以 VQC 策略模块在基站 VQC 软件中增加接受远方数据接口,通过电压控制的方法检测电压变化趋势,由 WANS 数据中心综合分析系统稳定运行的要求和 VQC 控制策略及时下达控制命令,在预测到电压失稳或电压崩溃瞬时发出闭锁命令或者调整策略。

### 3.3 全网实时电压自动控制系统(AVC)

现代电力系统中,通讯网络与调度自动化系统扮演着越来越重要的角色,实现基于电站的 VQC 分散型控制向基于能量管理系统(EMS)的全网自动电压无功优化控制——AVC 的转变乃大势所趋。

AVC 是根据 SCADA 系统所采集的全网实时运行参数,以电压优质和网损最小为目的,进行在线优化分析计算,分层调节发电厂励磁、变电站和用户无功补偿装置以及变压器分接头等实时最优闭环控制,调整系统无功功率的合理分布,实现全系统最优运行状况的优化控制过程<sup>[31]</sup>,即实现从局部最优到全局最优的过程。从运行安全性与经济性着眼,控制的主要策略即实现分层、分区控制<sup>[32]</sup>。分层主要是按电压等级进行无功平衡控制,分区主要指无

功的就地平衡。分层分区协调控制将一个主网控制目标根据区域和电网层次特点逐步分解,各个区域电网和地方下级电网则按各自控制目标进行协调控制。

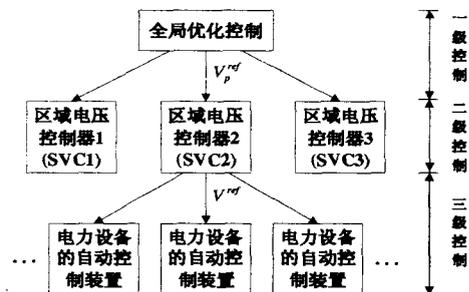


图5 AVC系统3级控制组织模式

Fig.5 Three-layer control structure mode of AVC system

目前,国内外已广泛注重 AVC 系统的开发和应用。欧洲一些发达国家普遍采用图5所示的3级组织模式<sup>[33]</sup>。这种分级分区的电压控制策略已经在法国、意大利等多个国家付诸实施且运行多年,取得了满意的效果。我国电力系统发展迅猛,运行工况也大幅变化,以硬件形式固定下来的区域控制器难以适应,同时研制地理上分布的区域控制器投资也很大。因此对国内各网、省调,欧洲这种3级组织模式在实现上是有一定困难的。

国内一些地区调度中心也配备了基于分区规则表及无功优化软件相结合的地区性 AVC 系统;一些省调 EMS 高级应用软件中也安装了最优潮流或无功优化软件,为全网性无功优化控制奠定了基础。地调的 AVC 系统开发应用研究较多,国电自动化研究院开发了基于控制模式的地区电网 AVC 系统,遵循无功在高电压水平下分层分区平衡原则,通过协调控制,全面实现 AVC 的各种控制目标,提出了区域电压控制,就地电压控制和区域无功控制3种控制模式<sup>[34]</sup>。

省调 AVC 系统已在东北,湖南,江苏,安徽等地进行了开发和运行,AVC 基本都采用了三级电压控制方式,对网损、无功分布、电压质量的控制效果明显。文献[35]提出的混杂自动电压控制(HAVC)基于离散—连续分层建模方法应用于东北电网,以离散事件为驱动主体,同时考虑电压动态性能、电压稳定性以及网络损耗等3项优化目标。文献[36]介绍湖南电网公司采用的经济压差进行全局无功优化的思想,即以每条线路的电压降落纵分量最小为目标求解最优潮流的思想。文献[37]突破传统的地域性的分区划分,提出了“软分区”的三级电压控

制思路,在控制中心建设“软”二次控制和“软”三级控制,以软件方式实现解耦性和相关性较好的结合。

近年来,人们尝试将新兴的智能优化方法,如遗传算法、免疫算法、蚁群算法和粒子群算法与内点法等传统优化算法结合,获得多种新型的智能混合优化算法,并将其引入到了AVC领域,以进一步提高无功优化的实时性和最优点的搜索能力<sup>[38-40]</sup>。此外,粗糙集理论<sup>[41]</sup>、多代理系统原理<sup>[42]</sup>等也被引入到该领域。这些新型方法的出现极大地丰富了AVC控制策略。

#### 4 结语

通过对国内外在VQC和AVC研究成果的总结和综述,笔者认为以下四个方面内容是未来需要重点研究的内容:

(1) 地区电网VQC和省网AVC的协调控制问题。目前在广东省电网,为了避免注重局部的VQC控制目标与注重全局的AVC控制目标矛盾冲突,在AVC主控站下一般要求将地区电网VQC闭锁。这在一定程度上解决了VQC与AVC在策略上的矛盾问题。但对原有VQC资源是一个浪费。应结合电力系统分层控制、分层协调优化的特点,重点研究地区电网VQC和省网AVC的协调控制策略。

(2) 省网、大区电网AVC和AGC的协调控制问题。由于AVC需要对发电机组励磁系统进行控制,而AGC则对发电机组原动机系统进行控制,但在很多情况下,受发电机运行特性的限制,往往无法同时满足AGC对有功功率和AVC对无功功率的控制要求。应结合电力系统预防控制和紧急控制要求,在满足电力系统暂态功角稳定和静态功角稳定裕度的同时,尽可能考虑动态电压稳定性的提高。

(3) 引入更多的辅助电压控制手段,提高整个电力系统的电压稳定和动态无功支撑能力。HVDC和FACTS已经更多地出现在电力系统中,HVDC换流站的无功控制(包括逆变器 $\gamma$ 调制和电容器投切),SVC和SVG等动态无功控制,都会极大地丰富电力系统的电压无功控制手段,提高电力系统的动态电压稳定性。

(4) 分布式发电系统的出现会深刻改变传统电力系统无功电压控制理念。分布式发电系统,如风力发电、光伏电池、微型燃机和燃料电池系统对传统供电系统的末端均有良好的电压支撑和无功调节能力。分布式发电系统的出现会给传统电力系统的电压无功控制带来深刻的变化。

电力系统VQC是一种离散控制行为,AVC则是一个连续和离散控制结合的混杂控制系统。混杂系统的最优控制和协调控制在现代控制理论界还存在许多需要深入研究的内容,将混杂系统的最新理论成果引入到电力系统电压无功控制必将获得更多的理论和实践成果。

#### 参考文献

- [1] 厉吉文,潘贞存. 变电所电压和无功自动调节判据的研究[J]. 中国电力, 1995, 28(7): 12-15.  
LI Ji-wen, PAN Zhen-cun. Study and Analysis on Substation Voltage and Reactive Power Automatic Regulating Criteria[J]. Electric Power, 1995, 28(7): 12-15.
- [2] Civanlar S, Grainger J J. Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(11): 3291-3297.
- [3] 庄侃沁,李兴源. 变电站电压无功控制策略和实现方式[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(15): 47-50.  
ZHUANG Kan-qin, LI Xing-yuan. Strategies and Implementation Modes of Voltage and Reactive Power Control for Substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(15): 47-50.
- [4] 芦洪涛,厉吉文. 通信技术在电压无功综合自动控制系统中的应用[J]. 中国电力, 2005, 38(3): 43-46.  
LU Hong-tao, LI Ji-wen. Study and Application of Communication Technique in Voltage and Reactive Power Integrated Automatic Control System[J]. Electric Power, 2005, 38(3): 43-46.
- [5] PAN Ke, HAN Xue-shan. A Reactive Power Optimization Method Based on the Decomposition and Coordination Theory for AVC in Power System[A]. In: 2004 International Conference on Power System Technology[C]. 2004. 872- 875.
- [6] 赵登福,司喆. 新型变电站电压无功综合控制装置的研制[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 14-17.  
ZHAO Deng-fu, SI Zhe. Research of a New Integrated Control Set for Voltage and Reactive Power in Substation [J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 14-17.
- [7] 沈曙明. 变电站电压无功综合自动控制的实现与探讨[J]. 继电器, 2000, 28(11): 60-62.  
SHEN Shu-ming. Discussion and Implementation of Voltage-reactive Control in Substation [J]. Relay, 2000, 28(11): 60-62.

- [8] 王函韵. 新型自动电压无功调节控制系统在 220 kV 变电站的实际运用[J]. 继电器, 2003, 31(1): 67-69.  
WANG Han-yun. Application of a New Automatic Voltage and Reactive Power Control System in 220 kV Substation [J]. Relay, 2003, 31(1): 67-69.
- [9] 蔡凯. 电压无功综合控制装置控制原理的新讨论——由“九区图”到“五区图”[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(19): 92-95.  
CAI Kai. New Discussion on Synthetical Control of Voltage and Reactive Power——from Nine-zone Theory to Five-zone Theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19): 92-95.
- [10] 孙文生, 张明军. 五区图变电站电压无功控制原理研究[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(12): 39-41.  
SUN Wen-sheng, ZHANG Ming-jun. Study on Five-zone Theory of Substation VQC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12): 39-41.
- [11] 孙文生, 张明军. 基于操作动作效果预算比较的电压无功综合控制原理[J]. 继电器, 2006, 34(2): 35-40.  
SUN Wen-sheng, ZHANG Ming-jun. Study on Voltage and Reactive Power Control Based on Operation Effect Calculation and Comparison[J]. Relay, 2006, 34(2): 35-40.
- [12] 张明军, 厉吉文, 董洁. 模糊边界的电压无功调节判据[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(11): 58-59.  
ZHANG Ming-jun, LI Ji-wen, DONG Jie. Voltage and Reactive Power Regulation Criteria with Fuzzy Boundaries[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(11): 58-59.
- [13] 许之晗, 刘晓川. 变电站电压无功模糊控制系统的研究[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(3): 15-19.  
XU Zhi-han, LIU Xiao-chuan. Research on Fuzzy Control of Substation Voltage and Reactive Power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(3): 15-19.
- [14] Kasztenny B, Rosolowski E. Fuzzy Logic Controller for On-load Transformer Tap Changer [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(1): 164-170.
- [15] 何南强, 刘予丹. 具有自辨识功能的模糊自动电压无功控制装置[J]. 电网技术, 2000, 24(4): 52-56.  
HE Nan-qiang, LIU Yu-dan. A Fuzzy Automatic Voltage and Reactive Power Control Device with Self-recognition[J]. Power System Technology, 2000, 24(4): 52-56.
- [16] Kevin Tomsovic. A Fuzzy Linear Programming Approach to the Reactive Power/voltage Control Problem [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 287-293.
- [17] QI Xiao-man, LIU Di-chen, HE Sheng. A Novel Comprehensive Adaptive Control of Voltage & Reactive Power in Substation[A]. In: Power Electronics and Motion Control Conference[C]. 2004. 873-877.
- [18] SU Ching-Tzong, LIN Chien-tung. A New Fuzzy Control Approach to Voltage Profile Enhancement for Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1654-1659.
- [19] Kim Kwang-Ho, Youn Hyoung-Sun, Kang Yong-Cheol. Short-term Load Forecasting for Special Days in Anomalous Load Conditions Using Neural Networks and Fuzzy Inference Method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 559-565.
- [20] Chen S J. An Expert System for Voltage and Reactive Power Control of a Power System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(4): 1449-1455.
- [21] 苏泽光. 变电站电压无功控制研究[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(12): 19-22.  
SU Ze-guang. Research on Voltage and Reactive Power Control of Substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(12): 19-22.
- [22] 杨争林, 孙雅明. 基于 ANN 的变电站电压和无功综合自动控制[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(13): 10-13.  
YANG Zheng-lin, SUN Ya-ming. The Synthetic and Automatic Control of Substation Voltage and Reactive Power Based on ANN [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (13): 10-13.
- [23] Lu F C. A Combined Artificial Neural Network-fuzzy Dynamic Programming Approach to Reactive Power / Voltage Control in a Distribution Substation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(4): 1265-1271.
- [24] Hsu Yuan-Yih, Yang Chien-Chuen. A Hybrid Artificial Neural Network Dynamic Programming Approach for Feeder Capacitor Schedule[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 1069-1075.
- [25] 李琰, 郭宗仁. 基于海明神经网络的电压——无功功率自动调节理论的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(1): 34-36.  
LI Yan, GUO Zong-ren. Study on Auto-Regulation Theory for Voltage——Reactive Power Based on Hamming[J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 14(1): 34-36.
- [26] Suzuki M, Morirna E. Coordinated AVQC Operations of EHV Transformer's Tap Changer by Fuzzy Expert Control System[A]. In: 2002 International Conference on

- Power System Technology[C]. 2002. 1679-1684.
- [27] 靳希, 齐晓曼, 等. 蓝牙技术在变电站 AVQC 装置中应用[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(2): 51-53.  
JIN Xi, QI Xiao-man, et al. Application of Bluetooth in Substation AVQC Apparatus[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(12): 59-62.
- [28] Ohtsuki H, Yokoyama A, Sekine Y. Reverse Action of On-Load Tap Changer in Association with Voltage Collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(1): 300-306.
- [29] 王均华. 基于电压稳定性对电压无功控制的改进[J]. 中国电力, 2006, 39(10): 61-65.  
WANG Jun-hua. An Improvement of Voltage and Reactive Power Automatic Controllers Based on Voltage Stability[J]. Electric Power, 2006, 39(10): 61-65.
- [30] Larsson Mats, Karlsson Daniel. Coordinated System Protection Scheme Against Voltage Collapse Using Heuristic Search and Predictive Control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 1001-1006.
- [31] 黄华, 高宗和. 基于控制模式的地区电网 AVC 系统设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 77-80.  
HUANG Hua, GAO Zong-he. 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.
- [32] WANG Hai-feng. Coordinated Secondary Voltage Control to Eliminate Voltage Violations in Power System Contingencies [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 588-595.
- [33] Paul J P, Leost J Y, Tesseron J M. Survey of the Secondary Voltage Control in France: Present Realization and Investigations [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(2): 505- 511.
- [34] 胡金双, 吴文传. 基于分级分区的地区电网无功电压闭环控制系统[J]. 继电器, 2005, 33(1): 50-56.  
HU Jin-shuang, WU Wen-chuan. A Reactive Power/Voltage Closed Loop Control System for Regional Power Grid Based on Hierarchical Level and Decomposed Zone[J]. Relay, 2005, 33(1): 50-56.
- [35] 王智涛, 胡伟. 东北 500 kV 电网 HAVC 系统设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(17): 85-88.  
WANG Zhi-tao, HU Wei. Design and Application of HAVC System in the 500kV Power Grid of Northeast China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(17): 85-88.
- [36] 唐寅生, 周全仁. 湖南 500kV 电网自动电压控制方法研究[J]. 中国电力, 2001, 34(8): 31-34.  
TANG Yin-sheng, ZHOU Quan-ren. Study on Method of Automatic Voltage Control for 500 kV Power Network in Hunan [J]. Electric Power, 2001, 34(8): 31-34.
- [37] 孙宏斌, 张伯明. 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, 2003, 27(8): 16-20.  
SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming. Design for Global Optimal Voltage Control System Based on Soft Identification of Secondary Control Zones [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 16-20.
- [38] Yoshida H, Kawata K, Fukuyama, et al. A Particle Swarm Optimization for Reactive Power and Voltage Control Considering Voltage Security Assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4): 1232-1239.
- [39] 李国柱, 王平, 陈星莺. 基于免疫算法的变电站电压无功综合控制[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(4): 15-18.  
LI Guo-zhu, WANG Ping, CHEN Xing-ying. Substation Voltage and Reactive Power Control based on IA[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(4): 15-18.
- [40] 李乃湖, 丁怡. 基于原一对偶内点法的电压无功实时优化控制算法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(5): 20-23.  
LI Nai-hu, DING Qia. Primal-Dual Interior Point Method Based Real-Time Voltage/Reactive Power Control Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(5): 20-23.
- [41] 束洪春, 孙向飞. 粗糙集理论在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 90-95.  
SHU Hong-chun, SUN Xiang-fei. A Survey on the Application of Rough Set Theory in Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 90-95.
- [42] 刘红进, 袁斌. 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 Hong-jin, YUAN Bin. Multi-agent System and Its Application in Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(19): 45-52.

收稿日期: 2007-08-10; 修回日期: 2007-09-12

作者简介:

余涛 (1974-), 男, 副教授, 博士, 长期从事电力系统稳定性、非线性鲁棒协调控制等方面的研究工作; E-mail: taoyu1@scut.edu.cn

周斌 (1984-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统电压控制和电压稳定方面的研究。