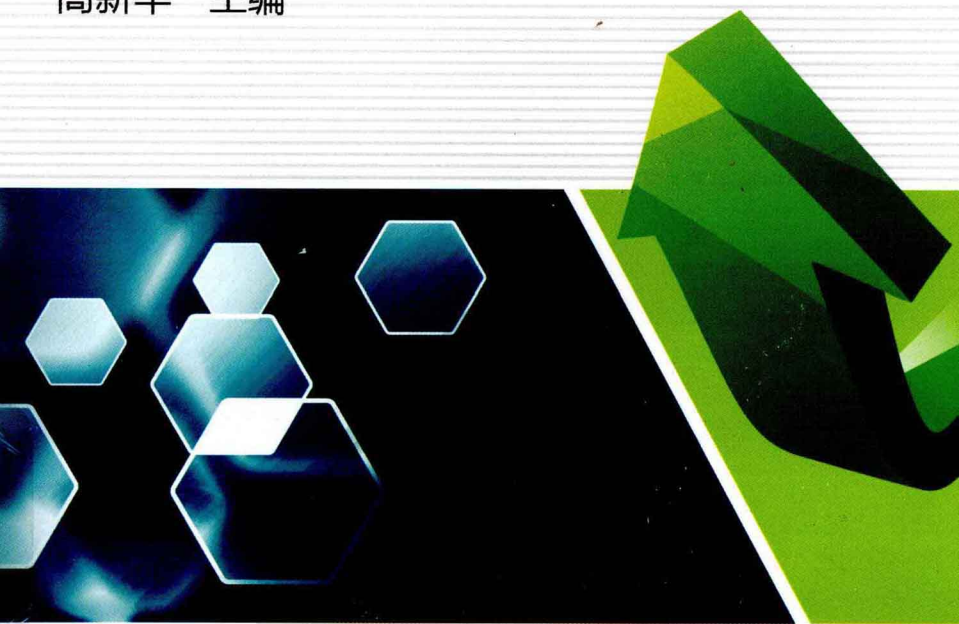


# 电压无功控制系统 测试评估原理及应用

高新华 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

# 电压无功控制系统 测试评估原理及应用

高新华 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书系统地阐述了电压无功控制系统测试评估的原理及应用,全书共分为8章,主要内容包括电压无功控制系统的概述、仿真模型和理论、核心测试信息模型、可视化理论、电压无功控制理论、电压无功控制系统的评价理论、系统的功能设计、地区电网电压无功控制系统的智能仿真及评估系统等。

本书结构清晰,内容丰富,适合从事电压无功控制系统测试评估相关专业人员阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

电压无功控制系统测试评估原理及应用 / 高新华主编. —北京:中国电力出版社, 2012.9

ISBN 978-7-5123-2623-1

I. ①电… II. ①高… III. ①无功电压—电压控制—自动控制系统—研究 IV. ①TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第229957号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2012年12月第一版 2012年12月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 5.625印张 137千字

印数 0001—3000册 定价 18.00元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前言

随着电力行业的迅猛发展，电网的规模日益扩大，结构日趋复杂，电力需求不断增长，对电网的发展和运行提出了更高的要求。电压无功控制是保证电力系统安全、经济运行的一项有效手段，是提高电压质量的重要措施，但目前尚未有评估方法对电压无功控制系统运行的效果进行有效的评估。本书旨在提出一套完整的电压无功控制系统评价理论，为电压无功控制系统评估提供依据。

本书在借鉴国内外相关领域研究成果的基础上，介绍了仿真模型和理论、核心测试信息模型、可视化理论、电压无功控制理论、电压无功控制系统的评价理论、系统的功能设计、地区电网电压无功控制系统的智能仿真及评估系统。全书共分为 8 章，第 1 章和第 2 章由高新华、陈炯聪编写，第 3 章和第 4 章由周伊琳、段新辉编写，第 5 章和第 6 章由卢建刚、胡亚平编写，第 7 章和第 8 章由李琴、孙建伟、黄缙华编写。

本书在编写过程中，广东省电力调度通信中心、四川大学等单位给予了大力支持，在此，对以上单位及专家表示衷心的感谢。

由于时间仓促，加之作者水平有限，书中不足和不妥之处在所难免，敬请广大读者加以批评指正。

编者

2012 年 1 月

# 目录

## 前言

<b>1</b>	<b>概述</b>	<b>1</b>
1.1	背景	1
1.2	国内主要厂家的电压无功控制系统	10
<b>2</b>	<b>仿真模型和理论</b>	<b>15</b>
2.1	电力系统仿真技术的发展趋势	15
2.2	电力系统仿真模型	17
2.3	电力系统的仿真	24
<b>3</b>	<b>核心测试信息模型</b>	<b>30</b>
3.1	CIM 模型结构和应用	30
3.2	可缩放矢量图形模型和应用	34
3.3	自动电压控制系统模型和应用	43
<b>4</b>	<b>可视化理论</b>	<b>46</b>
4.1	可视化的基本思想和原则	46
4.2	基于 IEC 61970/61968 的三维建模技术	47
4.3	可视化实现的关键技术	52
<b>5</b>	<b>电压无功控制理论</b>	<b>64</b>
5.1	电力系统电压及无功功率控制	64

5.2	地区无功与电压协调控制	70
5.3	无功优化核心算法	76
5.4	电网无功与电压的优化控制协调策略	85

## 6 电压无功控制系统的评价理论 89

6.1	概述	89
6.2	评价指标研究情况概述	89
6.3	评价方法的研究概述	94
6.4	电压无功控制系统的评价方法	106

## 7 电压无功控制系统的功能设计 113

7.1	概述	113
7.2	可视化平台的设计	113
7.3	仿真系统的设计	116
7.4	评估系统的设计	122
7.5	智能案例系统的设计	131

## 8 地区电网电压无功控制系统的智能仿真及评估系统 135

8.1	系统功能简介	135
8.2	系统结构及配置	136
8.3	电压无功控制用户接口	142
8.4	电压无功优化控制	145
8.5	可视化图形编辑平台	148
8.6	智能案例生成及管理系统	159
8.7	仿真及评估系统	166
8.8	基于 CIM 的 SVG 标准及其维护应用	169
8.9	可视化数据展示	170

	参考文献	173
--	------	-----

# 1

## 概 述

### 1.1 背 景

自动电压控制 (Automatic Voltage Control, AVC) 技术集安全、经济和优质于一体, 可实现全局多目标优化闭环控制, 近年来得到了国内外科研人员和运行人员的高度重视, 也有越来越多的工程应用成果问世。但是必须承认, 建立完善的自动电压控制系统是一项复杂的系统工程, 与具有单一频率控制标准的自动发电控制 (Automatic Generation Control, AGC) 不同, 大电网不同区域往往有不同的电压控制要求, 而且还具有控制设备多样性、无功电压非线性强等特点。迄今为止, 尚有不少问题未得到很好的解决。

#### 1.1.1 主要的控制模式

国内外的 AVC 工程实践证明, 控制模式的研究和选择是 AVC 工程实施成败的决定性因素, 目前主要存在以下三种控制模式。

##### 一、两层电压控制模式

从 1984 年开始, 德国莱茵集团在控制中心利用最优潮流方法 (Optional Power Flow, OPF) 对电网的无功分布情况进行调整, 在状态估计的基础上, 优化每小时启动一次 (或者由调度员手工启动), 并给出对控制变量的调节策略。在这种控制模式下, 系统一级的控制策略仍然是通过发电机的自动电压调节器 (Automatic

Voltage Regulator, AVR) 等本地控制设备完成的, 也属于一种分级电压控制, 称其为两层电压控制模式。两层电压控制模式可以看做是最优潮流的在线闭环应用, 其基本的组织结构框图如图 1-1 所示。这种控制模式比较简单, 投资小, 但完全依赖 OPF, 因此存在以下几个方面的不足。

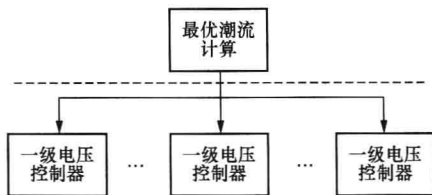


图 1-1 两层电压控制模式框图

(1) OPF 运行在能量管理系统 (Energy Management System, EMS) 的最高层次上, 对 EMS 各软硬件环节的运行质量和可靠性有很高的要求, 每个环节的局部异常都可能导致 OPF 发散或者优化结果不可用; 同时对状态估计的精度、可靠性和依赖性也很高, 局部的量测通道问题都可能影响 OPF 的计算结果。因此, 如果完全依赖 OPF, AVC 的运行可靠性难以保证。

(2) OPF 作为静态优化计算, 主要考虑电压上下限约束和网损最小化。如果完全依赖 OPF, 则 AVC 难以对电压稳定性进行协调。当负荷重载时, 优化后的发电机无功出力可能搭界, 无功裕度均衡度不好, 使系统承担事故扰动的能力下降, 无法确保电压稳定性。

(3) OPF 模型计算量大, 计算时间较长。当系统中发生大的扰动、负荷陡升或陡降时, 如果完全依赖 OPF, 则 AVC 的响应速度不够, 控制的动态品质难以保证。

## 二、基于硬分区的三层控制模式

法国电力公司 (EDF) 对三级电压控制模式的研究和实施始



于 20 世纪 70 年代，经历了 40 余年的研究、开发和应用。1972 年，在国际大电网会议上，来自法国电力公司的工程师提出了在系统范围内实现电压协调控制的必要性。三级电压控制模式以中母线、控制区域为基础，其基本思想如图 1-2 所示。

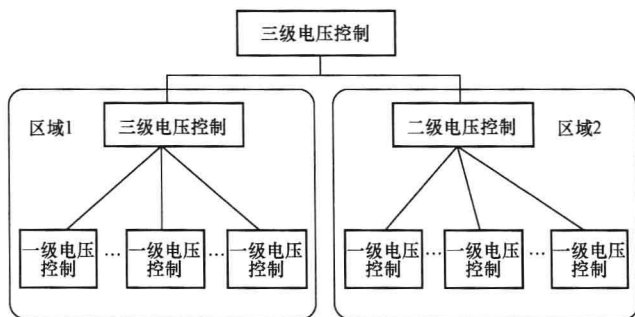


图 1-2 三层电压控制模式框图

三层电压控制模式在法国、意大利、比利时都得到了较好的应用。与两层电压控制方案相比，三层电压控制模式最大的变化在于利用无功电压的区域特性将电网划分成了若干彼此解耦的控制区域，并在此基础上实现分级分区电压控制，整个控制系统由一级电压控制（Primary Voltage Control, PVC）、二级电压控制（Secondary Voltage Control, SVC）、三级电压控制（Tertiary Voltage Control, TVC）组成。在实施二级电压控制时，对于每个控制区域建立了专门的区域控制中心，并将控制策略通过硬件方式固化在控制器中，这种方式的不足在后续的应用中日益明显。区域二级电压控制是基于无功电压的局域性而开发的，其控制质量在根本上取决于各区域间无功电压控制的解耦程度。随着电力系统的发展和运行工况的实时变化，设计时认为相对解耦的区域并非一成不变，控制灵敏度更是随运行工况而实时变化，因此这种以硬件形式固定下来的区域控制器难以适应电力系统的不断发展和实

时运行工况的大幅度变化，无法持久地保证良好的控制效果。

### 三、基于软分区的三层电压控制模式

中国电网目前处在一个快速发展的阶段，网架结构变化频繁，类似于法国电力公司的硬分区模式难以适应中国电网的实际情况。针对国内电网的特殊需求，提出基于软分区的三层电压控制模式，并在江苏省级电网得到了实际应用，取得了较好的控制效果。整个控制系统由运行在控制中心的主站部分和运行在电厂侧的子站部分构成，二者通过高速电力数据网通信。

和法国电力公司的三层电压控制模式相比，这种控制模式有以下特点和优势：

(1) 三级电压控制和二级电压控制都在控制中心实现，不需要建立专门的区域控制中心。

(2) 在控制中心，在线软分区模块根据当前拓扑结构和运行情况，将电网划分成若干控制区域，并可以在线跟踪网架结构的变化，及时反映电网最新的无功电压解耦特性。

(3) 每个控制区域利用软件实现二级电压协调控制，其控制目标是实现中枢母线电压维持在设定值的同时，保证控制发电机运行在裕度更大、无功出力更均匀的状态下。

(4) 在二级控制模块中，在线计算得到准稳态控制灵敏度，体现了控制设备的准稳态无功电压外特性，保证控制决策的精度。

#### 1.1.2 AVC 技术的难点问题

有功和无功是电力系统分析与控制的两大主题，相对于无功电压控制（AVC），自动发电控制（AGC）已经应用多年并相当成熟，而无功电压控制的发展却相对滞后，近年来随着电力系统分析水平和计算机技术的提高才逐步成为热点。之所以存在这样的情况，除了因为电网运行人员更重视有功频率（有功频率与自动发电控制息息相关）问题之外，还因为无功电压控制本身所固有的难点。

## 一、控制目标

电压控制的目的是实现电网的安全、经济、优质运行，因此电压控制问题本身涵盖了电压稳定分析、无功优化计算和闭环控制等诸多领域，求解难度大。

## 二、控制对象

全网的频率是唯一的，但是全网每一个节点的电压却各不相同，且电网内的无功调节设备有限，因此电压控制问题不是一个完全可控问题，无法保证将所有节点的电压控制到位。

## 三、控制设备

无功电压控制设备包括了发电机、调相机等连续调节设备，还包括电容器、电抗器和有载调压分接头等离散调节设备，一些地方还配备了先进静止无功发生器（ASVG）、高压动态无功补偿装置（SVC）等柔性交流输电系统（FACTS）快速控制装置。不同控制设备的差异很大，尤其是离散调节设备还涉及控制动作次数和控制时间间隔等相关约束，这些都为控制策略的求解增加了难度。

## 四、调度体制

无功电压调节设备广泛分布在网、省、地各级电网中，随着自动电压控制技术的逐步推广，由于调度体制的限制，未来网、省、地各级电网都将建立各自的 AVC 系统，这些不同层面上的 AVC 系统控制的范围是按照相对应的调度范围来进行划分的，但是它们的控制对象——电网实际上是一个密不可分的整体，在某级 AVC 系统的建设过程中，如何考虑与上级或者下级 AVC 系统的统筹协调，是一个难题。

## 五、数学模型

与有功频率问题相比，无功电压问题的非线性程度高得多，因此一些成熟的线性化数学方法应用时遇到了困难。

## 六、基础自动化

AVC 属于广域控制系统，但是电网的基础自动化水平仍然处

于一个逐步完善的过程中，量测系统经常会出现局部故障或者精度不高的情况，特别是无功量测的精度通常被忽视。而 AVC 系统一旦投入使用就势必要求长时间的在线运行，如何在这种情况下保证控制系统的可靠性和鲁棒性是系统设计和实施过程中必须面对的问题。

### 1.1.3 当前研究的三条主线

从目标、时间和空间三个维度对本领域现有的研究内容进行了归纳和分析，指出其研究重点。可以说，目标维度、时间维度和空间维度构成了当前自动电压控制研究的三条主线。

#### 一、目标维度主线

维持电网的电压安全、电压质量和经济运行是电压控制系统追求的三个主要目标。而经济运行和电压安全往往是一对互相制约的目标，保证电压质量也并不一定带来电压安全的保障。在不同的电网运行状态下，电压控制的主要目标也在发生变化。如何将这些目标进行有效的协调，正是在目标维度上要加以解决的问题，目标维度上的相关研究重点包括以下四方面：

(1) 如何判定电网是否处于电压崩溃的危险之中，这涉及如何在线、实时地给出电网电压稳定性的实用指标。

(2) 当电网处于电压崩溃的危险之中时，采用怎样的预防控制策略可以避免或者延缓电网出现电压崩溃。

(3) 在稳态电压控制范畴内，应合理设计电压控制规律，以便能够利用电压闭环控制来实现电网的经济性目标和安全性目标的协调。

(4) 如何在经济、安全、优质这些不同的控制目标之间实现协调。

#### 二、时间维度主线

无论是何种分级控制方式，都需要从时间维度上进行解耦合协调，以避免不同级控制器之间的相互干扰，同时实现上级对下

级控制器的协调。各级控制的周期是由不同层次的电压控制器本身的控制时间常数所决定的。此外，随着高速同步相量采集（PMU）技术的广泛应用，系统级的动态电压控制也将成为可能。时间维度的研究包括以下重点内容：

（1）如何协调电容器、电抗器等离散控制设备与发电机等连续调节设备之间的关系。

（2）对于每一级电压控制，尤其是三级电压控制（基于全网优化计算），如何选取合适的控制周期和启动方式。

（3）结合负荷预测的结果，对电网运行态势进行正确的分析，研究是否有助于改善实时控制的效果。

（4）如何基于 PMU 技术，对电压动态稳定性实施系统级的实时快速控制。

### 三、空间维度主线

在空间维度上，一个很重要的问题是控制目标空间的压缩问题，即对电网进行合理的控制区域划分，从中选取最具代表性的节点作为控制目标，从而将控制目标映射到一个较小的空间，使原有的不可控问题转换成可控问题。无功电压问题具有固有的区域特性，如果充分利用这一特点，可以有效地降低控制策略求解的难度，提高电压控制系统的鲁棒性。同时，网、省、地各级电网的 AVC 系统都具有自身的控制范围，如何有效协调不同层次的 AVC 系统，同样也是空间维度上所关注的问题。在空间维度上，需要重点研究如下问题：

（1）是否需要控制区域的划分，分区域控制的意义何在。

（2）如何对电网进行合理的控制分区，使得不同区域之间的耦合性尽可能小。

（3）如何选取合适的中枢母线和控制发电机。

（4）如果区域间的耦合不能忽略，如何在控制过程中加以考虑。

(5) 网、省、地级 AVC 系统之间如何协调。

#### 1.1.4 我国网、省、地三级协调控制

我国互联电网规模庞大，其运行由分层分区的多级调度机构来负责管理。通常情况下，网调负责管理跨省的 500kV 联络输电网，省调负责管理省内 500kV 和 220kV 输电网，地调负责管理地区内 110、66、35、10kV 配电网。传统的自动电压控制系统针对各级电网独立控制，相互之间缺乏有效协调。事实上，由于各级电网之间影响很大，传统的独立控制方法存在很大局限性。图 1-3 所示为网、省、地三级的 AVC 协调控制模式。

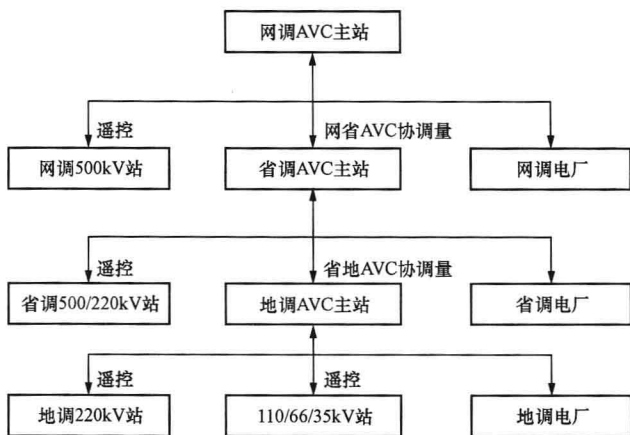


图 1-3 网、省、地三级的 AVC 协调控制模式

在图 1-3 中，对于网调 AVC，其主要任务有：①网调直调厂站的自动电压控制；②给出并下发网、省 AVC 协调变量的设定值，对省调 AVC 进行协调控制。

对于省调 AVC，其主要任务有：①省调直调厂站的自动电压控制；②追随网调给出的协调变量设定值；③给出并下发省、地 AVC 协调变量的设定值，对地调 AVC 进行协调控制。

对于地调 AVC，其主要任务有：①地调直调厂站的自动电压控制；②追随省调给出的协调变量设定值。

调研表明，除了独立电网自动电压控制存在的问题之外，网、省、地三级协调控制还需解决以下四个方面的特殊问题：

(1) 由于历史的原因，无功电压控制设备（包括发电机、调相机、电容/电抗器、变压器分接头等）的调度权限复杂，边界不清，相互影响大，如何从我国电网调度体制的实际出发，设计好协调控制模式，划分好控制系统的级别，以及各级控制的控制对象、控制目标、约束条件和控制周期，研究并确定上下级电网之间适用的协调变量、广域通信机制和通信周期，是首先要解决的基础问题。

(2) 由于电网规模十分庞大，各级调度中心只能做到对自己调度范围内的电网进行实时建模，存在不可观测问题，无法满足上下级协调的无功优化计算的需要。以网调为例，一般只建了 500kV/220kV 主干输电网的实时模型，缺少各省内一些重要 220kV 输电网和发电设备，如何通过电网模型的在线自动拼接，实现包含网、省级电网的全局无功优化计算，是一个需要解决的技术难点。

(3) 在下级电网的优化控制决策中，除了满足本级电网的安全优质和经济运行的多目标外，还必须实时追随由上级电网给出的协调变量的设定值，保证与上级协调变量的设定值相匹配，这需要提出适用的数学方法和控制策略，比独立电网的电压优化控制更加复杂。

(4) 大电网的无功电压问题规模庞大，运行数据众多，特别是将网、省、调三级电网协调在一起之后，问题更为复杂，安全性、电压质量和经济性多目标问题交织在一起，使得调度员难以监视。如何利用实时三维可视化技术，将大电网的网络损耗、电压质量、安全裕度、无功储备等关键变量的时空分布直观地展示

在调度员面前，也是需要解决的技术难点之一。

## 1.2 国内主要厂家的电压无功控制系统

### 1.2.1 OPEN-3000 电压无功控制系统简介

#### 一、概要

基于 OPEN—3000 电网调度自动化集成系统的电压无功优化自动控制 (AVC) 系统，其主要功能是在保证电网安全稳定运行的前提下，保证电压和功率因数合格，并尽可能降低系统因不必要的无功潮流引起的有功损耗。AVC 与 OPEN—3000 平台一体化设计，从电网高级应用软件 (PAS) 网络建模获取控制模型、从监控与数据采集系统 (SCADA) 获取实时采集数据并进行在线分析和计算，对电网内各变电站的有载调压装置和无功补偿设备进行集中监视、统一管理和在线控制，实现全网无功电压优化控制闭环运行。

#### 二、主要功能

该 AVC 系统主要有以下功能：

(1) 在网络模型的基础上，根据 SCADA 实时遥信信息，实时动态跟踪电网运行方式的变化，正确划分供电区域，实现动态分区调压。

(2) 程序既可闭环运行，也可开环运行。

(3) 提供方便的图形界面，对程序的控制参数进行修改。

(4) 具有良好的数据库在线管理、维护和修改功能。

(5) 调节手段已用完，而电压还处于不合格状态时，将给出无法满足要求的电压点的信息。

(6) 发遥控命令后，报警提示信息。

(7) 具有事件记录功能，可记录所有的系统事件，调节事件和异常报警事件。



### 三、系统构成

该电压无功自动控制系统主要由三个模块构成，即自动电压调整程序（AVC\_MAIN）、遥控程序（DO\_CTLs）和报警程序（AVC\_ALM）。AVC\_MAIN 通常只运行在 PAS 节点上，它从 SCADA 获得电网的实时运行状态，根据分区调压原则，对电网电压进行监视，发现电压异常时给出相应的调节措施。当系统处于自动控制状态时，将调节措施交给 SCADA 的遥控程序，执行变压器分接头的调整和电容器的投切，遥控环节是电压无功自动控制系统的关键环节，电压无功自动控制系统运行是否成功将在很大程度上决定于电网基础自动化状况。报警程序负责显示自动调压程序给出的调压措施和遥控程序所做的自动调压措施。信息流向如图 1-4 所示。

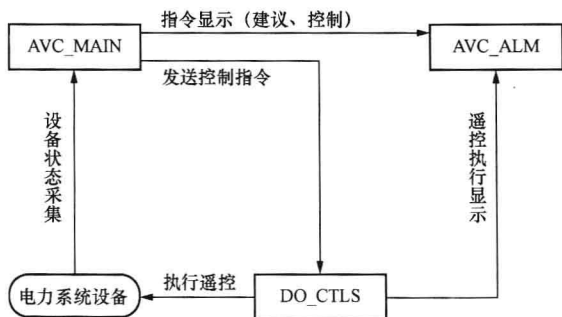


图 1-4 信息流向

#### 1.2.2 DF8003 电压无功控制系统简介

##### 一、概要

DF8003 系列是基于客户/服务器机制建立的电压无功控制（AVC）系统，可在系统内配置两台 AVC 服务器节点，另外根据用户的需求可配置多个 AVC 客户机。运行时以操作中心为单位，一台客户机作为主控机，可以进行遥控遥调命令的下发以及修改维