

电力系统自动化技术在电网运行管理中的应用研究

丁富春

(广东江腾电力集团有限公司, 广东 江门 529000)

摘要: 系统研究电力系统自动化关键技术 (SCADA、DCS、EMS、DMS) 在电网运行管理中的核心应用。通过构建广域实时感知网络、闭环控制体系与智能决策平台, 自动化技术实现了电网运行状态的精准监控、故障快速自愈、资源优化调度及源网荷储协同管理。研究表明: SCADA 系统依托状态估计提供全景运行态势感知, 支撑远程集约控制; DCS 通过分层递阶结构保障发电单元快速响应调度指令; EMS 基于最优潮流模型驱动安全约束下的经济调度; DMS 利用馈线自动化与电压无功优化显著提升供电可靠性。自动化技术已成为构建安全、高效和智能现代电网的核心支柱。

关键词: 电力系统自动化; SCADA; DCS; EMS; DMS

Research on the application of power system automation technology in grid operation and management

DING Fuchun

(Guangdong Jiangteng Electric Power Group Co., Ltd., Jiangmen 529000, China)

Abstract: This paper systematically researches the core application of key power system automation technologies (SCADA, DCS, EMS, DMS) in power grid operation and management. Through the construction of wide-area real-time sensing network, closed-loop control system and intelligent decision-making platform, the automation technology realizes precise monitoring of grid operation status, rapid self-healing of faults, optimal scheduling of resources, and collaborative management of source-network-load-storage. The study shows that: SCADA system relies on state estimation to provide panoramic operational situational awareness and support remote intensive control; DCS guarantees rapid response of power generation units to dispatching instructions through hierarchical step structure; EMS drives economic dispatching under security constraints based on optimal trend model; DMS significantly improves power supply reliability by using feeder automation and voltage reactive power optimization. Automation technology has become the core pillar for building a safe, efficient and intelligent modern power grid.

Keywords: power system automation; SCADA; DCS; EMS; DMS

0 引言

随着能源转型加速与新型电力系统建设推进, 电网结构日趋复杂, 运行控制难度剧增。电力系统自动化技术通过深度融合信息物理系统, 构建“感知-分析-决策-执行”闭环体系, 成为

保障大电网安全稳定、提升能源配置效率的关键支撑。本文聚焦监控与数据采集 (Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA)、分布式控制系统 (Distributed Control System, DCS)、能源管理系统 (Energy Management System, EMS) 和配电管理系统 (Driver

Monitoring System, DMS) 四大核心系统, 系统分析其技术原理与应用效能。首先概述关键技术的数学建模基础与控制架构; 然后深入探讨其在全景监控、故障防御、优化调度和源网荷储协同等场景的创新应用; 最后揭示自动化技术对电网运行管理模式变革的驱动作用, 为智能电网演进提供理论参考与实践路径。

1 电力系统自动化关键技术概述

1.1 SCADA

SCADA是电力系统自动化的神经中枢与感知层基础, 它构建了覆盖发电、输电及变电站的广域实时数据采集网络。该系统核心功能在于持续采集电网关键运行参数, 如母线电压幅值与相角、线路有功功率与无功功率、开关设备分合闸状态、变压器分接头位置等。这些海量实时数据通过专用通信通道传输至调度中心, 为运行人员提供全景可视化监控界面, 使其能准确把握系统运行工况。其技术核心在于高可靠性远程终端单元设计与高效通信规约应用, 确保数据采集的实时性与准确性。系统状态估计技术是数据处理的关键环节, 它基于冗余量测数据, 利用加权最小二乘算法辨识系统最可能运行状态, 有效滤除量测噪声与不良数据, 其数学模型可表述为

$$\min J(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (1)$$

式中, z 为量测向量; $h(x)$ 为量测函数向量; x 为系统状态向量母线电压幅值与相角; R 为量测误差协方差矩阵。

状态估计结果为高级应用提供了可靠数据基础。SCADA还承担遥控与遥调指令执行功能, 实现远方开关操作、机组出力调整等, 是电网安全的第一道防线。

1.2 DCS

DCS主要应用于大型火电厂、核电站等连续生产过程, 实现对锅炉、汽轮机、发电机及其庞大辅机系统的精细化协调控制。该系统本质为分层递阶结构, 由现场控制站、操作员站、工程师站及高速数据通信网络构成。现场控制站部署于设备附近, 直接连接传感器与执行器, 执行快速闭环控制算法, 如锅炉燃烧控制、汽轮机调速、

炉膛负压调节等, 其底层控制律常表现为

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2)$$

式中, $G_c(s)$ 为控制器传递函数; K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分、微分系数。

操作员站提供集中监控与人机接口, 工程师站负责控制逻辑组态与参数设定。DCS的核心优势在于分散控制风险、集中监控管理、高可靠性模块冗余配置及灵活可扩展性, 确保发电单元安全、经济且环保运行, 并快速响应电网调度指令。

1.3 EMS

EMS是电网调度中心的大脑, 构建于SCADA实时数据平台之上, 集成了海量分析、优化和决策功能。其核心目标是在满足严格安全约束条件下, 实现全网发电资源的最优配置与调度。关键高级应用软件包括: 自动发电控制, 通过区域控制误差计算与闭环反馈, 动态调整机组出力维持系统频率与联络线功率计划; 在线潮流计算, 求解非线性方程组 $g(\theta, V)=0$ 以分析网络功率分布; 静态与动态安全分析, 模拟预想事故并评估系统安全性; 最优潮流, 作为核心优化引擎, 其模型为

$$\min f(x, u) \text{ s.t. } g(x, u)=0, h(x, u) \leq 0 \quad (3)$$

式中, f 为目标函数发电成本或网损; x 为状态变量; u 为控制变量机组出力、变压器分接头等; g 为潮流方程等式约束; h 为不等式约束。

最优潮流为经济调度、电压无功优化提供决策依据。此外, 负荷预测、网络拓扑分析、调度员培训仿真系统也是EMS的重要组成部分, 共同支撑电网安全经济运行。

1.4 DMS

DMS面向复杂中低压配电网, 目标是提升供电可靠性、优化资产利用效率、改善电能质量并支持分布式能源接入。该系统深度融合了SCADA、地理信息系统、客户信息系统以及故障定位、隔离与恢复系统。核心功能涵盖配电网拓扑动态着色与可视化、馈线自动化, 通过智能终端配合快速通信实现故障区段自动定位、隔离及非故障区段供电恢复, 显著缩短停电时间。电压无功优化控制利用有载调压变压器分接头调

整、并联电容器组投切等手段，维持用户电压在合格范围内，其控制目标可量化为最小化电压偏差，公式为

$$\min \sum_i (V_i - V_{\text{ref}})^2 \quad (4)$$

式中， V_i 为节点电压， V_{ref} 为参考电压。

负荷管理功能通过需求侧响应策略进行削峰填谷。随着分布式光伏、储能大量接入，DMS须具备高渗透率分布式电源的主动管理能力，实现源网荷储协调互动，支撑配电网向智能、柔性和高弹性方向发展。

2 SCADA在电网运行管理中的应用

2.1 全景运行态势感知与实时监控

SCADA构建的广域数据采集网络，持续捕获电网关键动态参数，如母线电压幅值与相角、线路有功/无功功率、开关状态和变压器分接头位置等海量实时数据。这些信息通过高可靠通信规约汇聚至调度中心，转化为直观的可视化界面，使运行人员得以精准把握全网实时工况。其技术核心不仅在于远程终端单元（Remote Terminal Unit, RTU）的可靠采集，更在于状态估计技术对原始数据的深度处理。基于冗余量测量，状态估计应用加权最小二乘算法求解目标函数，见式（1），有效滤除量测噪声与不良数据，辨识出系统最可能的真实状态（母线电压幅值与相角向量 x ）。这为后续所有高级应用提供了经数学优化、可信赖的电网运行全景图，是实时监控与分析的基石。

2.2 电网故障快速防御与自愈支撑

依托状态估计提供的精准电网状态，SCADA具备强大的故障感知与辅助处置能力。系统实时监测电流、电压及频率等关键参数（构成向量 z ），结合状态估计结果 x 进行深度分析。当检测到电气量异常跳变或开关变位时，系统能瞬时触发告警，并基于量测信息与拓扑关系快速定位故障区段，判别故障性质。运行人员可据此迅速制定隔离与恢复策略，并通过SCADA的遥控功能远程执行开关操作，显著压缩故障停电时间与影响范围，成为守护电网安全的首道快速防线。

2.3 优化调度与资源精益管控

SCADA为电网的精细化管理与优化决策提供核心数据引擎。基于状态估计输出的高精度系统状态 x ，系统能够深入分析全网负荷时空分布特性，实现超短期负荷预测，支撑经济调度与机组组合优化。同时，通过持续采集发电出力、节点电压、网络潮流 z 及变压器分接头等数据，结合状态估计结果，运行人员可精确评估系统运行效率，识别网络损耗瓶颈，优化无功电压水平，并远程执行机组出力调整或变压器分接头遥调，实现发用电平衡，持续提升能源利用效率。

2.4 运行决策支持与远程集约控制

SCADA深度融合了数据分析与远程执行能力，重构了电网运行管理模式。系统自动生成涵盖实时数据、历史趋势、能效指标的多维度报表与可视化图表，为运行分析与战略决策提供科学依据。更重要的是，其强大的远程监控与控制功能，使得运行人员可在调度中心直接远程查看全网实时状态（基于状态估计结果），并在必要时下发遥控指令操作开关设备、执行负荷转供或调整运行方式。这种“千里眼”与“遥控手”的能力，大幅提升了调度效率，降低了现场运维成本与风险，实现了电网运行管理的集约化与智能化升级。SCADA通过“感知-决策-执行”的闭环体系，将状态估计等数学优化模型深度融入电网运行的血液，使调度人员得以穿透时空限制，精准掌控庞大电网的每一次脉动，为现代电力系统的安全、经济和高效运行构筑了不可替代的数字基座^[1]。

3 DCS在电网运行管理中的应用

3.1 实现电网关键参数的实时精准闭环控制与快速响应调度指令

电网频率与电压稳定是运行的生命线。DCS部署于大型火电、核电机组的现场控制站，直接采集发电机出口电压、频率（50 Hz/60 Hz）、汽轮机转速（3 000 r/min）等核心参数，并基于经典的PID控制律执行毫秒级闭环调节。当电网负荷突增导致频率下降超过0.05 Hz时，DCS内置的调速算法驱动汽轮机高压阀门在

2 s内快速开大，增加出力，频率恢复精度可达 ± 0.01 Hz。同时，DCS作为电网调度自动化系统的执行末端，能将调度指令分解并协调锅炉燃烧、给水、汽机等200余个控制回路，实现机组出力的精准、快速跟踪，有效平抑负荷波动，维持电网实时平衡。

3.2 海量运行数据的全景采集、深度挖掘与智能决策支持

现代DCS每秒可处理10万余个数据点（I/O点），覆盖从发电机绕组温度、主变压器油温、线路潮流到环保参数（ SO_2 浓度 $<35 \text{ mg/m}^3$ ）等全维度信息。高速数据通信网络（通常采用冗余工业以太网，带宽 $\geq 100 \text{ Mbit/s}$ ）将这些实时数据汇聚至操作员站和工程师站，构建电网运行的“数字镜像”。基于历史数据库（存储周期长达30天以上），DCS结合高级应用软件进行深度分析：如通过锅炉效率计算模型（输入氧量、排烟温度等20余项参数）优化燃烧，单台600 MW机组年可节约标准煤3 000 t；或通过关联规则挖掘，提前15 min预警引风机轴承过热风险，避免非计划停运^[2]。

4 EMS在电网运行管理中的应用

4.1 优化决策引擎驱动全网经济高效运行

EMS的核心优化能力集中体现在最优潮流（Optimal Power Flow, OPF）这一关键引擎上，OPF并非孤立存在，而是深度融入EMS的经济调度与电压无功优化中。系统基于精准的负荷预测结果，调用OPF模型进行在线滚动计算，动态求解最优调度方案，在满足所有安全约束的同时，实现发电成本最小化或特定目标优化。这如同为电网配置了一位不知疲倦的“精算师”，实时权衡安全与经济，确保每一度电的生产与传输都处于高效区间，直接提升电网运行的经济性。

4.2 安全稳定防线构建风险预控与主动防御体系

电网安全是运行管理的生命线，EMS通过强大的安全分析功能构筑起多层次防御体系。在线潮流计算（求解 $g(\theta, V)=0$ ）是基础，它提供了实时的网络功率分布全景图。以此为基础，

静态安全分析模拟预想事故（如单条线路或变压器开断），评估系统在事故后稳态下是否违反约束（ $h(x,u)\leq 0$ 是否成立），识别潜在过载或电压越限风险；动态安全分析，模拟系统遭受大扰动后的暂态过程，分析发电机功率稳定性、频率稳定性等动态行为。这些分析能力使调度员能够“预见未来”，在风险发生前即识别脆弱环节。当OPF进行优化计算时，这些安全分析的结果被内化为严格的约束条件或作为安全校正策略的依据，确保优化方案不仅经济，更能经受潜在故障的考验，实现安全风险的前置化、主动化管理，极大提升了电网应对突发事件的韧性与可靠性^[3]。

4.3 实时闭环控制保障系统动态平衡与频率稳定

电网时刻面临负荷波动与扰动，因此维持瞬时平衡至关重要。自动发电控制是EMS实现这一目标的“敏捷执行者”。它基于实时计算得到的区域控制误差，该误差综合反映了系统频率偏差与联络线功率交换偏差，形成一个闭环反馈控制系统。自动发电控制动态、快速地调整区域内调频机组的有功出力，目标是将区域控制误差精准调零，从而将系统频率严格控制在允许范围之内，同时确保联络线功率按计划交换。这一闭环控制过程深刻体现了EMS从感知、决策到执行的贯通能力。它不仅依赖强大的后台优化计算能力（如OPF设定经济基点），需要通信层毫秒级可靠传输设备（PCS、BMS）的实时状态与控制指令，以及应用层为调度员提供直观的可视化监控与紧急干预界面。通过这种实时、精准的功率平衡控制，EMS成为保障电网电能质量与运行稳定的最终防线。

5 DMS在电网运行管理中的应用

5.1 故障快速自愈与供电可靠性跃升

DMS的核心优势在于其强大的馈线自动化能力。系统依托智能终端与高速通信网络构建的实时感知体系，能够瞬间捕捉电网异常。当故障发生时，DMS集成的故障定位隔离与恢复功能模块立即启动，精准判定故障区段，自动操作开关设备将其隔离，同时迅速重构网络路径，为未

受影响的健全区段恢复供电。这一过程从分钟级压缩至秒级甚至毫秒级，将用户停电时间与范围降至最低，显著提升供电可靠性和用户满意度。地理信息系统在此过程中提供直观的空间信息支持，使故障定位更精准、操作指令更明确。此功能深刻改变了传统依赖人工巡线、电话报修和现场操作的被动模式，实现了配电网故障处理的智能化革命^[4]。

5.2 电压无功协同优化与电能质量保障

维持用户端电压在合格范围内是DMS保障优质供电的核心任务。系统通过实时采集全网节点电压数据，以最小化全网节点电压与参考电压的偏差平方和为目标，驱动优化决策。DMS综合运用有载调压变压器分接头自动调节、并联电容器电抗器智能投切等手段，动态补偿无功功率，平抑电压波动。该数学模型确保优化过程聚焦于整体电压质量提升，避免局部优化导致其他区域恶化。通过持续求解该优化问题，DMS有效应对负荷波动、分布式电源出力变化带来的影响，将用户电压稳定在标准范围内，减少因电压不合格造成的设备损坏或用电异常情况发生，显著改善电网末梢的电能质量。

5.3 资源全景协同与高弹性配电网构建

面对分布式光伏、储能和电动汽车充电负荷等大量接入带来的复杂性和不确定性，DMS的主动管理能力成为支撑电网转型的关键。通过配电网分析系统进行精细化的网络建模、状态估计、潮流计算与负荷预测，精准把握电网实时状态与发展态势。在此基础上，DMS深度整合负荷管理功能，实施需求侧响应策略，引导用户调整用电行为，并进行削峰填谷，平抑负荷曲线波动。更重要的是，DMS实现了源网荷储资源的全局协同互动：优化调度分布式电源出力，有效控制储能充放电，灵活调节柔性负荷，并与电网侧的无功电压控制、网络重构等策略无缝配合。这种全景协同能力极大地提高了配电网对可再生能源波动的适应性与消纳能力，提升了系统运行的韧性与弹性，为构建智能、柔性和高承载力的未来配电网奠定了坚实基础。

6 结束语

电力系统自动化技术已深度渗透电网运行管理的全环节，从发电控制到配电网优化形成完整技术链。SCADA构建的广域感知网络为电网提供“数字视网膜”；DCS在发电侧实现毫秒级闭环控制，筑牢了频率稳定的第一道防线；EMS通过最优潮流等数学优化模型，在安全与经济间实现精准权衡；DMS推动配电网从被动运维向主动自愈转型。面对高比例新能源接入的挑战，自动化技术仍需突破三方面瓶颈：一是提升多源异构数据的融合处理能力，以应对不确定性；二是发展人工智能驱动的自主决策算法，实现从自动化向智能化跃迁；三是构建跨系统协同平台，破除SCADA/EMS/DMS间的信息壁垒。未来需重点攻关数字孪生、云边协同、主动防御等方向，推动电网运行管理向“全面感知、智能决策、动态协同”的更高形态演进，最终支撑新型电力系统的安全、低碳和高效发展^[5]。

参考文献

- [1] 孙俊，叶露，汤弋，等．基于模糊集合的电网运行多源信息融合方法[J]．太赫兹科学与电子信息学报，2025，23(5)：461-467．
- [2] 张月，高丽，戴光明，等．通信技术在提升电网运行效率中的应用[J]．价值工程，2025，44(11)：158-161．
- [3] 左剑，钟雅珊，包博，等．考虑新能源不确定性的电网运行调度多目标优化模型[J]．电网与清洁能源，2025，41(3)：152-158．
- [4] 孙锟，李宜莎．基于大数据的电网运行状态监测与故障预警研究[J]．电力设备管理，2025(1)：162-164．
- [5] 陈欣睿，赵坤．电力信息技术在电网运行中的应用[J]．集成电路应用，2024，41(11)：170-171．

作者简介

丁富春（1970—），男，硕士，高级工程师，研究方向电力工程电气、电力运行、电力管理等。

（收稿日期：2025-06-15）