

统一潮流控制器团体标准体系研究

陈羽飞^{1*} 李群² 田晓鹏¹ 林金娇² 何永君¹

(1.中国电机工程学会; 2.国网江苏省电力有限公司电力科学研究院)

摘要: 统一潮流控制器(UPFC)是目前功能最强、特性最优的线路潮流控制装置,对于大电网的安全运行和提高可再生能源的消纳都有重要的意义。本文在分析UPFC技术发展的基础上,深入研究了UPFC标准研究现状,制定了团体标准体系设计原则,设计了包含基础综合部分、规划建设、调度运行、检修维护、设备装备5个方面,24项具体标准的统一潮流控制器(UPFC)标准体系架构,总结了该标准体系应用情况及重要意义,并采用多层次灰色综合评价方法对该体系进行综合评价。

关键词: UPFC, 团体标准, 电网安全, 柔性交流输电, 产业升级, 灰色综合评价

DOI编码: 10.3969/j.issn.1674-5698.2023.12.011

Research on the Association Standards System of the Unified Power Flow Controller

CHEN Yu-fei^{1*} LI Qun² TIAN Xiao-peng¹ LIN Jin-jiao² HE Yong-jun¹

(1. Chinese Society for Electrical Engineering;
2. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Company)

Abstract: The Unified Power Flow Controller (UPFC) is currently the most powerful and optimal line power flow control device, which is of great significance for the safe operation of large power grids and the improvement of renewable energy consumption. In the paper, on the basis of analyzing the development of UPFC technology, the current research status of UPFC standards is thoroughly studied, and the design principles of UPFC association standard system are formulated. A unified power flow controller (UPFC) standard architecture is designed, which includes five aspects: basic comprehensive part, planning and construction, scheduling and operation, maintenance and repair, and equipment equipment, and 24 specific standards. The application and significance of the standard system are summarized. At last, the UPFC association standard is comprehensively evaluated by the grey comprehensive analysis method.

Keywords: UPFC, association standards, grid security, flexible AC transmission, industrial upgrading, grey comprehensive evaluation

基金项目: 本文受国家自然科学基金资助项目“适应统一潮流控制器复杂运行工况的线路继电保护原理研究”(项目编号: 51707090)资助。

作者简介: 陈羽飞, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 长期从事电力行业科技管理、项目咨询、标准化相关工作。

李群, 博士, 研究员级高级工程师, 从事柔性输电技术、FACTS 技术在电力系统中的应用、新能源并网技术相关工作。

田晓鹏, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统调控技术、电力科技咨询与标准化相关工作。

林金娇, 硕士, 高级工程师, 从事柔性输电控制保护技术、特高压输电控制保护技术相关工作。

何永君, 硕士, 工程师、高级设备监理师, 从事电力系统前瞻性技术研究和电力科技成果管理工作。

0 引言

随着我国特高压电网和新能源装机容量的迅速发展,以及电力新设备、新技术的不断应用,电网特征也发生了深刻的变化,目前我国电网的规模和复杂度已达世界之最,使得电力系统运行与控制愈加复杂^[1-2]。发电调节、负荷转移等传统潮流控制手段,速度慢、效果差,已逐渐难以满足现代电网运行需求。如何灵活、快速、高效地实现复杂潮流的调节和控制,是大型、智能电网发展的技术瓶颈问题,更是实际工程建设当中亟需解决的关键问题^[3-5]。

统一潮流控制器(UPFC)是目前功能最为强大、特性最优的柔性交流输电装置,其功能主要有四4个方面^[6, 7]: (1) 线路母线或节点电压的幅值调节; (2) 线路串联补偿; (3) 线路电压相角差调节; (4) 电压幅值、相位、串联补偿的综合调控。而UPFC技术的拓扑结构复杂,技术研发难度大,长期以来,全球UPFC技术和市场被美国企业独家垄断^[1, 8-10]。

历时十余年,我国攻克了UPFC核心技术、关键设备、工程应用等系列难题,2015年12月南京城市电网220kV西环网统一潮流控制器(UPFC)示范工程的成功应用,打破了美国企业对该技术的独家垄断,并实现了一系列技术突破^[11-13]。UPFC技术改善了现有的电力传输水平,保障了电力系统的安全可靠运行,对电网的发展产生了重要的影响^[14-15]。技术标准化是技术应用、发展和创新的基础,科学、完善的技术标准体系不仅为新技术的推广应用铺平了道路,更是工程质量、技术进步、提高生产效率、提升技术核心竞争力的重要保障和手段^[16-18]。

1 统一潮流控制器标准研究现状

我国开展UPFC标准研究制定前,国际上尚无UPFC相关标准。UPFC技术发展及应用面临的主要问题有以下几点。

(1) UPFC技术先进,其规划建设、设备研制、试验检测等各环节技术要求不明确、不系统,工程

应用无章可循。

(2) UPFC接入电网运行方式特殊,其规划、设计难度大,且缺乏依据,系统参数、功能配合设定困难,限制UPFC作用发挥,甚至影响电网安全运行。

(3) UPFC关键设备与传统输变电设备区别大,其设计、制造、检验需求不完善,易造成可靠性低、研制周期长等问题,不能满足产业发展和技术推广的需要。

随着我国UPFC技术发展及相关工程的应用,世界所有UPFC标准均由我国主导编制,其中编制UPFC相关IEC标准2项、IEEE标准1项。前者包括《Performance of unified power flow controller (UPFC) in electric systems》《Unified power flow controller (UPFC) installations—System tests》,目前已发布1项;后者包括《Guide for Technology of Unified Power Flow Controller Using Modular Multilevel Converter: Part 1 Functions》《Part 2 Terminology》《Part 3 Thyristor Bypass》《Part 4 Control and Protection Application》,目前已发布3项。

综上所述,针对UPFC标准体系的研究仍需进一步研究、细化和完善,需要在工程实践中不断迭代优化、总结。

2 统一潮流控制器团体标准体系设计原则

中国电机工程学会遵循GB 13016—2018《标准体系构建原则和要求》^[19],采用“综合标准化”理论统筹规划UPFC团体标准整体布局,经过确定标准化对象、目标后,进行整体性协调设计,进行了充分调查分析,系统性开展UPFC标准体系布局,原则包括以下几项。

(1) 明确性:基于UPFC系列技术成果,实现支撑电网潮流精准、灵活、快速控制的标准综合构建目标,基于此对构成要素进行梳理和分析。

(2) 全面性:系统梳理UPFC技术各个层次的关系,考虑目前已发布、制定中和待制定的标准,形成一个体系架构。

(3) 层次性:从技术环节对标准体系层次进

行划分,确定标准层级设计,技术环节主要包括基础综合、规划建设、调度运行、检修维护、设备装备等。

(4) 先进性:充分考虑团体标准特点,聚焦解决UPFC技术创新所需要制定的关键标准,指导UPFC技术标准化的发展方向。

(5) 协调性:保证标准体系框架中的标准既相互独立,又相互协调,明确各标准之间的界限。

(6) 灵活性:发挥团体标准其灵活、快速的特点,及时补充相关后续标准的立项、编制工作,同时协调各制定主体关系,实现国际团体与国内团体标准的同时立项。

3 统一潮流控制器团体标准体系

统一潮流控制器(UPFC)团体标准体系是UPFC技术市场化推广的需要,是UPFC技术成果的具体体现,是工程实践反复锤炼的结晶,为企业技术标准的制定和实际工程的规划、设计、建设、运营提供了科学依据和保障,在UPFC技术发展过程中具有里程碑的意义^[12-13]。

UPFC技术标准体系涵盖和满足了相关国家标准和行业标准,不仅是对国家标准和行业标准的有效补充,而且具有更强的技术创新性、针对性以及可操作性,技术指标均高于同类国家标准和行业标

准,是UPFC实际工程建设的重要依据和保障,对于UPFC技术发展创新、核心设备制造、重大工程应用,都具有重要意义。这其中,国家标准是基础,主要解决全国范围内需要跨行业协调的技术事项;行业标准主要解决行业内需要协调统一的技术事项。UPFC团体标准制定背景如图1所示。

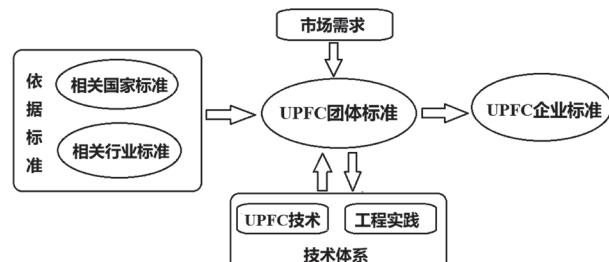


图1 UPFC团体标准背景

3.1 统一潮流控制器团体标准体系架构

2018年中国电机工程学会全面启动UPFC标准体系的建设,立足UPFC产业的发展需求,最大程度继承现有国内外的技术和标准成果,在UPFC标准整体布局框架下,采用“现代模块化+技术创新”深度融合的方式,有序转化为标准体系内容。内容涵盖了UPFC工程建设的全部阶段和各个环节,包括基础综合部分、规划建设、调度运行、检修维护、设备装备5大方面,共计24项标准(如图2所示),实现科技成果向技术标准高质量、大规模的有效转化。

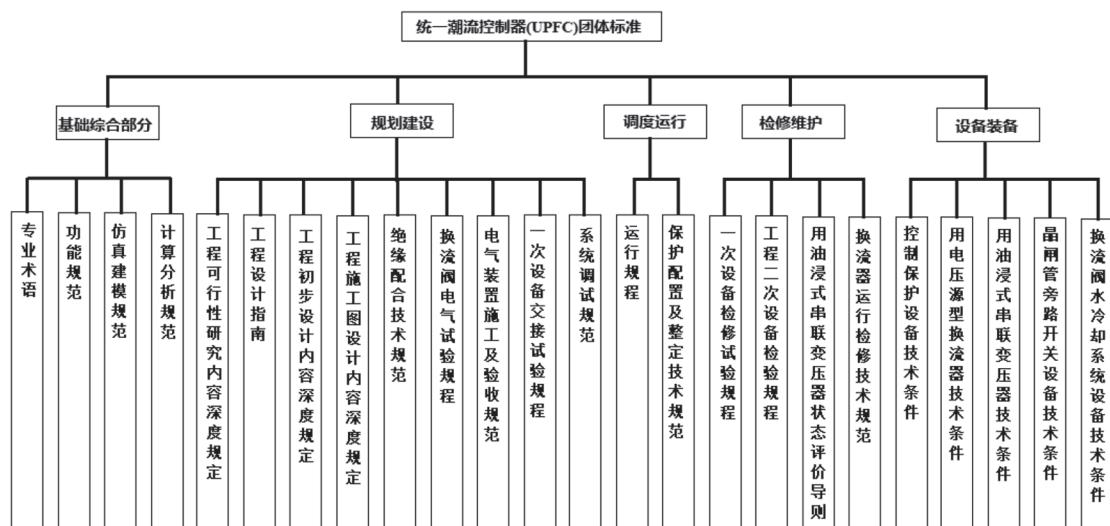


图2 统一潮流控制器(UPFC)标准体系架构

3.2 统一潮流控制器(UPFC)标准主要内容

统一潮流控制器(UPFC)团体标准涵盖了规划建设、关键设备、调度运行、检修运维等工程建设的各个环节，主要包括五大方面内容。

(1) 基础综合部分

基础综合部分规定了统一潮流控制器(UPFC)相关术语和定义，以及符号和缩略语，明确了其相关概念和内容，为后续标准的制定提供了统一的概念和术语准则；规定了UPFC的功能规范，主要包括系统构成、运行方式、控制工程、成套系统性能、主要设备、试验验证等要求，提出了新一代UPFC技术的功能、性能要求，是本系列团体标准的基础；同时，规范了UPFC仿真建模和计算分析，为UPFC的研究和应用提供了有效依据和保障。

(2) 规划建设

规划建设部分从统一潮流控制器(UPFC)站址容量选择、电气主设备、控制保护系统、配套交流线路工程、节能环保措施分析、投资估算及经济评价等方面，对UPFC工程的必要性、系统方案及工程方案进行了规定，提出了UPFC工程标准化设计原则、设计要求与设计方案，系统规定了选址定容、电气设计、主要设备选型、控制和保护设计等设计内容，保障UPFC工程建设的安全性、经济性和可靠性。主要包括工程可行性研究内容深度规定、工程设计指南、工程初步设计内容深度规定、工程施工图设计内容深度规定、绝缘配合技术规范、换流阀电气试验规程、电气装置施工及验收规范、一次设备交接试验规程、系统调试规范等9项标准。

(3) 调度运行

调度运行部分对统一潮流控制器(UPFC)的运行规程和继电保护配置及整定技术进行了详细的规定，主要包括保护的范围、功能配置、保护动作结果和配合以及保护整定计算遵循的原则。

(4) 检修维护

工程运维是UPFC技术应用的关键，统一潮流控制器(UPFC)团体标准详细规定了一次设备的专业巡检及年度检修试验项目和技术要求；二次设备检验的主要项目、方法及要求；油浸式串联变压器状态评价的信息分类、评价分类、评价基本要求、

状态量的量化标准、部件及整体的评价方法，以及状态检修的时间、内容和类别；换流阀的运行规定、设备异常及处理、检修策略、检修分类和等级、检修条件、检修项目及要求，共计4项标准。

(5) 设备装备

在UPFC设备装置方面，涵盖了MMC换流阀、串联变压器、快速旁路装置及控制保护系统等重要设备的标准。基于UPFC成套设备研制及应用成果，形成了UPFC关键设备技术要求体系，综合考虑UPFC接入电网运行特性及设备选型的经济性、安全性和通用性，提出关键设备技术要求，实现设备设计、生产、安装、检验规范化。详细规定了控制保护设备、电压源型换流器、油浸式串联变压器、晶闸管旁路开关、阀冷却设备的技术参数、技术要求、试验方法、检验规则以及标志、铭牌、随行文件、包装、运输、贮存等方面的要求，共计5项标准。

4 统一潮流控制器团体标准应用及意义

目前国内所有UPFC工程均采用了该系列标准，其中标准体系中电压原型换流器、油浸式串联变压器、控制保护设备等核心技术已在南京、苏州、上海等城市百余项MMC型STATCOM（又称SVG，UPFC的并联部分）工程中得到了应用，并出口至北美、东南亚等地。2015年12月南京西环网220kV UPFC工程投运，该工程是世界上首个模块化多电平UPFC工程^[20]，改善了西环网中北部500kV龙王山变电站和南部500kV东善桥之间关键输电断面潮流不均、线路过载等多重问题，将南京地区供电能力提升了60万千瓦；2017年12月苏南电网500kV UPFC工程建成，该工程是世界上容量最大、电压等级最高的UPFC工程，主要解决了梅里-木渎线严重的过负荷问题，确保了省外水电的消纳能力，总体可再生能源的消纳水平提升了130万千瓦^[21-23]；2017年9月建成上海电网220kV统一潮流控制装置示范工程，提升了电网关键潮流断面均衡能力、提高了电压稳定性和平衡分区电网无功分布等，将闸北至蕴藻浜断面输送能力由570MW提高到620MW，提升幅度为50MW，尤其将故障状态下电压稳定裕度

提高至500MW, 约占上海电网总负荷的1.6%^[24, 25]; 此外, 福建电网南北传输线路500kV UPFC工程有效降低了南北传输通道的过载问题, 大幅提高了电网传输的安全性^[1]。

该标准是世界上首部统一潮流控制器(UPFC)技术规范, 是在工程应用中不断迭代、优化、总结的成果, 在电网安全、技术进步、可再生能源消纳、关键技术国产化、智能电力设备新业态发展等方面都具有重要意义。具体表现在以下几点。

(1) 该团体标准及时地梳理了我国UPFC技术成果和工程经验, 填补了国内、外空白, 为UPFC技术的发展、创新及应用奠定了基础。有助于解决大电网潮流控制这一世界性难题, 提升了电网的安全性、可靠性和运行效率, 提升了我国大电网、智能电网的规划、建设、运营水平, 保障了国家用电安全。

(2) 该团体标准为UPFC工程建设提供了科学规范和依据, 有力地确保了工程质量, 解决了风、光、潮汐等可再生能源波动性给电网带来的风险, 提升了电网对可再生能源跨省、跨区域的输送能力, 提高了可再生能源的消纳水平, 是我国能源转型和实现“3060”碳达峰、碳中和目标的重要支撑。

(3) 该团体标准的出台, 标志着我国在柔性交流输电方面拥有了话语权, 打破了美国在这方面的技术垄断, 我国的UPFC装备制造已达到了国际先进水平, 在先进技术、先进装备国产化方面迈出了重要的一步, 为国产设备、装备的推广、出口铺平了道路。

(4) 该团体标准成果列入“中国制造 2025”先进设备, 有助于推动产业升级, 促进大容量 MMC 换流阀、串联变压器、控制保护设备等智能电力装备新业态的发展。江苏、上海等地方政府以及国家电网有限公司已将UPFC技术列入新技术推广应用计划。

5 标准评价

团体标准是国家标准体系的重要组成部分, 发展团体标准对于充分释放市场主体标准化活力, 优化标准供给结构, 提高产品和服务竞争力, 助推高质量发展具有重要意义。本文依据北京市2022年9月颁布的《高质量团体标准评价规范》^[26], 采用多层次灰色综合评价方法, 对UPFC团体标准进行质量评价。

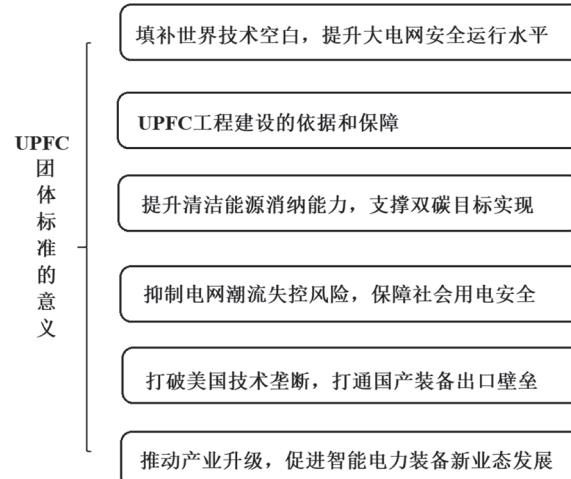


图3 UPFC标准意义

5.1 评价体系

高质量团体标准评价指标^[26]由关键指标和扩展指标构成, 其中关键指标包括创新性、先进性、适用性、国际性、规范性5个一级指标, 每项一级指标下又包括创新实现、创新产出、技术实现、领跑领先、实施应用等若干二级指标。扩展指标是对团体标准评价动态调整的指标, 起到锦上添花的作用, 可根据所属行业特点等具体情况调整增设。团体标准评价指标体系如图4所示。

专家评价量化体系主要以是否达到该项指标的全部要求或是达到国际、国外、国家、行业要求为依据, 分为显著、较显著、一般显著、不显著、非常不显著5级, 具体量化值见表1。

5.2 多层次灰色综合评价

多层次灰色综合评价步骤如下^[27-28]。

表1 团体标准评价量化值

量化级别	非常不显著	不显著	一般显著	比较显著	显著
量化值	[0, 1]	[1, 2]	[2, 3]	[3, 4]	[4, 5]

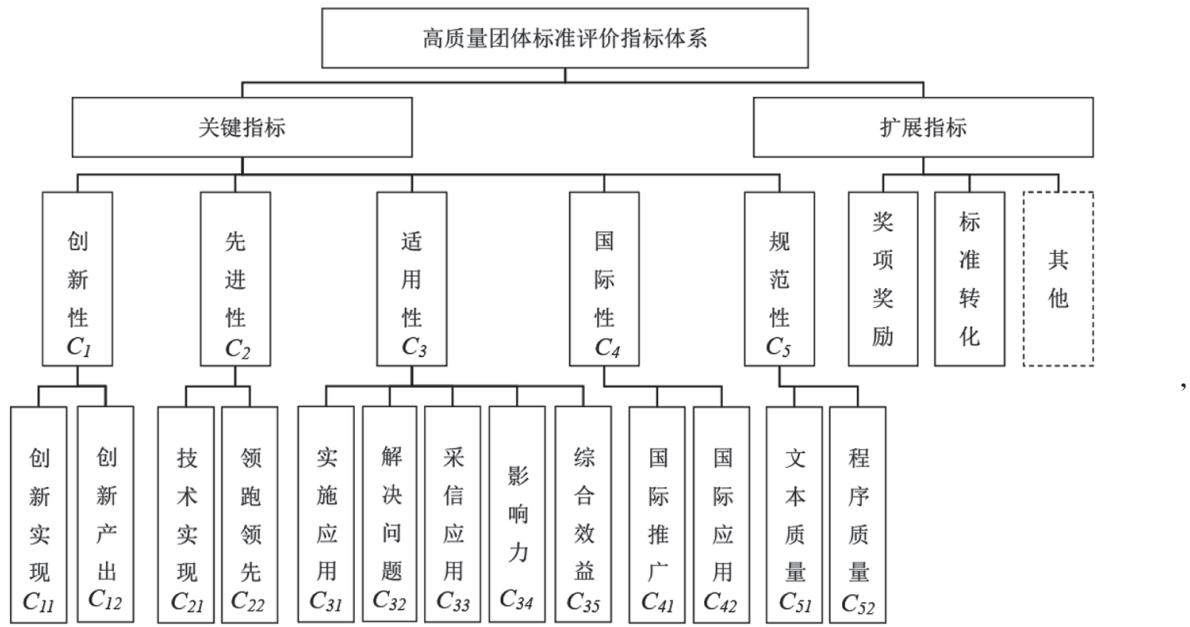


图4 高质量团体标准质量评价体系

(1) 确定专家量化评分等级

参照表1确定量化评分等级和具体分值,每项指标分值越高,说明团体标准对该项指标的契合程度越高。

(2) 确定评价样本矩阵

若有n位专家参与评价,那么按照上述评价等級量化标准得到的评价样本矩阵D如式(1)所示。

$$D = \begin{bmatrix} d_{111} & d_{112} & \cdots & d_{11n} \\ d_{121} & d_{122} & \cdots & d_{12n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{311} & d_{312} & \cdots & d_{31n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{s21} & d_{s22} & \cdots & d_{s2n} \end{bmatrix} C_{s4} \quad (1)$$

(3) 确定评价灰类

按照评价要求将各个指标的取值范围相应地划分为评价所需要的s个灰类,例如:将j指标的取值范围 $[a_1, a_{s+1}]$ 划分为s个区间 $[a_1, a_2], \dots, [a_{k-1}, a_k], \dots, [a_{s-1}, a_s], [a_s, a_{s+1}]$,其中, a_k ($k=1, 2, \dots, s, s+1$)的值可根据实际评价要求自主确定。则对于第j项指标的取值x,其属于第k($k=1, 2, \dots, s$)项灰类的三角白化权函数为:

$$f_j^k(x) = \begin{cases} 0 & x \notin [a_{k-1}, a_{k+2}] \\ (x - a_{k-1}) / (\lambda_k - a_{k-1}) & x \in [a_{k-1}, \lambda_k] \\ (a_{k+2} - x) / (a_{k+2} - \lambda_k) & x \in [\lambda_k, a_{k+2}] \end{cases} \quad (2)$$

由于团体标准的量化评价等级为5级(见表1),则具体评价指标的评价灰类也为5级,即 $s=5$, $k=1, 2, 3, 4, 5$ 。依据式(2)就可以得到每个灰类的白化权函数。

(4) 确定灰色评价系数

若评价指标 C_{ij} 属于第k项灰类的灰色系数为 M_{ijk} ,则:

$$M_{ijk} = \sum_{h=1}^n f_j^k(d_{jh}) \quad (3)$$

那么,评价指标 C_{ij} 所属于的所有灰类的总灰色系数为 M_{ij} ,则:

$$M_{ij} = \sum_{k=1}^s M_{ijk} \quad (4)$$

(5) 计算灰色评价权向量和权矩阵

评价指标 C_{ij} 的第k项灰类的灰色评价权为 α_{ijk} 则:

$$\alpha_{ijk} = \frac{M_{ijk}}{M_{ij}} \quad (5)$$

团体标准关键指标评价灰类共有5级,即 $s=5$,则评价指标 C_{ij} 对于各个灰类的灰色评价权向量为:

$$\alpha_{ij} = (\alpha_{ij1} \quad \alpha_{ij2} \quad \alpha_{ij3} \quad \alpha_{ij4} \quad \alpha_{ij5}) \quad (6)$$

由此可以得到指标 C_i 所属的二级指标 C_{ij} 对于各个灰类的灰色评价全矩阵为:

$$Q_i = \begin{bmatrix} \alpha_{i1} \\ \alpha_{i2} \\ \vdots \\ \alpha_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{i11} & \alpha_{i12} & \alpha_{i13} & \alpha_{i14} & \alpha_{i15} \\ \alpha_{i21} & \alpha_{i22} & \alpha_{i23} & \alpha_{i24} & \alpha_{i25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{ij1} & \alpha_{ij2} & \alpha_{ij3} & \alpha_{ij4} & \alpha_{ij5} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(6) 综合评价

评价指标 C_{ij} 的综合评价结果为:

$$E_i = \omega_i Q_i = (e_{i1} \quad e_{i2} \quad e_{i3} \quad e_{i4} \quad e_{i5}) \quad (8)$$

其中 ω 为一级指标的权重向量, 即:

$$\begin{aligned} \omega &= (\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3 \quad \omega_4 \quad \omega_5)^T \\ \omega_j &\in [0,1] \quad \text{且} \quad \sum_{j=1}^5 \omega_j = 1 \end{aligned} \quad (9)$$

依据式(8)可以得到评价指标 C_i 对应灰类的灰色评价权系数矩阵:

$$Q = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} & e_{15} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} & e_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{51} & e_{52} & e_{53} & e_{54} & e_{55} \end{bmatrix} \quad (10)$$

则一级评价指标 C_i 的综合评价结果为:

$$E = \omega Q = (e_1 \quad e_2 \quad e_3 \quad e_4 \quad e_5) \quad (11)$$

式(11)的综合评价结果是一个向量, 将式(11)的结果进行更直观的单值化处理后得到的综合评价值为:

$$W = EB^T \quad (12)$$

其中 B^T 为各灰类等级值向量的转置, 见表1, 即: $B = (1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5)$ 。

5.3 评价结果

邀请来自电网企业、基建公司、科研院所、高等学校、科研管理单位等8位专家对照各级指标对UPFC团体标准进行打分评价, 只考虑关键指标,

未考虑扩展指标, 其中确定的各一级指标权重为 $\omega = (0.18 \quad 0.18 \quad 0.36 \quad 0.1 \quad 0.18)^T$, 综合8位专家的打分情况, 计算得到灰色评价的综合评价值为 $W=4.30621$, 评价结果为UPFC团体标准显著达到北京市2022年9月颁布的《高质量团体标准评价规范》的要求。

6 结论

该系列标准是国际上首部统一潮流控制器(UPFC)技术规范, 是我国高端智能装备产业领域的重大创新成果, 在UPFC技术标准化、成套设备规范化、工程应用科学化、技术体系国际化、关键技术国产化等方面实现了重大突破。本文分析了统一潮流控制器标准体系发展现状, 对统一潮流控制器团体标准体系的设计原则、体系架构、主要内容、工程应用及意义进行了比较详细的介绍。该标准是工程实践中不断迭代优化的成果, 能够为UPFC设备制造和工程建设的全过程提供科学依据和技术保障, 是我国完全自主知识产权的新一代UPFC技术推广应用的基石。多层次灰色综合分析结果表明, 该UPFC团体标准体系显著达到了北京市2022年9月颁布的《高质量团体标准评价规范》的要求, 具备显著的适用性、创新性、先进性、规范性和国际性。

统一潮流控制器(UPFC)团体标准体系也要随着UPFC技术的发展不断更新和完善, 后续将根据国内外技术的发展需要, 结合实际工程实践, 持续推进标准化研究, 适时更新完善技术标准体系。此外, 团体标准的执行、贯彻, 团体标准内容的普及, 关键标准国际化等也是重点关注的工作和努力的方向。

参考文献

- [1] 刘津濂. UPFC的潮流调节特性及控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [2] 程启明, 陈颖, 程尹曼, 等. 基于MMC的统一潮流控制器反演滑模控制策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(06): 41–48.
- [3] 崔文超, 徐雷. 具有限流功能的新型统一潮流控制器及其控制[J]. 电力电子技术, 2022, 56(07): 83–86.
- [4] 孙国强, 张恪, 卫志农, 等. 基于深度学习的含统一潮流控制器的电力系统快速安全校正[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 119–127.
- [5] 郑涛, 汤哲, 张滋行, 等. 基于限流电抗器的统一潮流控制器故障渡越策略及其与保护的配合[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(02): 8–18+20.
- [6] Ajay P,Tausif M A,Sandeep B, et al. A robust single end-end disturbance detection scheme for superconducting fault current limiter integrated UPFC compensated line[J]. Elec-tric Power Systems Research, 2023: 223.
- [7] 孙蓉, 朱梓荣, 卫志农, 等. 计及UPFC的电力系统多阶段多目标无功优化算法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(01): 76–85.
- [8] 袁佳歆, 许顺凯, 余梦泽, 等. 一种配电网多线路混合式统一潮流控制器[J]. 电力工程技术, 2023, 42(01): 2–10.
- [9] 刘瀚琛, 王冲, 鞠平, 等. 计及统一潮流控制器的电力系统双层协调弹性调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(04): 159–167.
- [10] 罗玉春, 王毅, 闪鑫, 等. 调控系统中统一潮流控制器稳态建模的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(01): 148–157.
- [11] 丁寅龙. 统一潮流控制器工程设备现场测试方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- [12] 刘国静, 祁万春, 黄俊辉, 等. 统一潮流控制器研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 78–86.
- [13] 郑涛, 汤哲, 张滋行, 等. 统一潮流控制器对继电保护的影响及对策研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 171–178.
- [14] 陈凯龙. 混合式统一潮流控制器建模及其控制策略研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2022.
- [15] 王帅. 具备同步机特性的统一潮流控制器控制技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- [16] 李国庆, 成龙, 王振浩, 等. 电力物联网技术标准体系初探 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(03): 1–9.
- [17] 赵丙镇, 李达, 王栋, 等. 能源电力区块链技术标准体系研究[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 191–200+208.
- [18] 丁卫东, 张丽全, 许剑冰, 等. 电网安全稳定控制系统标准体系研究评述[J]. 电力工程技术, 2021, 40(01): 58–64.
- [19] GB/T 13016–2018, 标准体系构建原则和要求[S]. 2018.2.
- [20] 李群, 林金娇. 统一潮流控制器系列标准研制与应用[J]. 中国质量与标准导报, 2020(06): 58–61+64.
- [21] 李群, 林金娇, 李鹏. 500kV 苏南UPFC控制功能研究及性能试验[J]. 电力工程技术, 2018, 37(06): 13–19.
- [22] 张宝顺, 董云龙, 潘磊, 等. 苏南UPFC工程保护配合策略研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(01): 132–139.
- [23] 杨林, 蔡晖, 汪惟源, 等. 500kV 统一潮流控制器在苏州南部电网的工程应用[J]. 中国电力, 2018, 51(02): 47–53.
- [24] 谢伟, 崔勇, 冯煜尧, 等. 上海电网220 kV统一潮流控制装置示范工程应用效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(06): 136–142.
- [25] Yong Cui, Yinghui Yu, Wei Bao, et al. Analysis of application effect of 220 kV UPFC demonstration project in Shanghai grid[J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 758–762.
- [26] DB11/T 2020–2022, 高质量团体标准评价规范[S]. 北京.
- [27] 唐家文, 董兵, 孔建国. 基于学生满意度的管制模拟训练质量灰色评价研究[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(05): 187–191+195.
- [28] 杨圣文, 彭翀, 高璇, 等. 基于多层次灰色综合评价的口岸国际道路运输便利化测度[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(14): 5988–5996.