

双碳背景下特高压电网安全防御系统设计

古济铭¹, 宋云亭², 刘欣宇¹, 朱劭璇², 雷雨¹, 张同尊¹

(1. 国网重庆市电力公司, 重庆 400010;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要:在当前我国特高压交直流混联电网具有“强直弱交”和电力电子化特征的双碳背景下,为有效降低电网大面积停电风险,有必要构建安全可靠的电网安全综合防御系统,确保我国电力系统安全稳定运行。在我国已有的传统三道防线基础上,确定了适应我国电网在双碳背景下的特高压交直流电网安全防御系统应具有的目标和设计原则,设计了特高压交直流电网安全防御系统的总体架构、主要功能和具体的配置方案。

关键词:混联电网;综合防御系统;三道防线;配置方案

中图分类号:TM72 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25196

Design of Security Defense System for UHV Power Grids Under the Dual Carbon Background

GU Jiming¹, SONG Yunting², LIU Xinyu¹, ZHU Shaoyuan², LEI Yu¹, ZHANG Tongzun¹

(1. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400010, China;

2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: Under the dual carbon background of AC and DC hybrid power grids have the new feature of "strong HVDC and weak AC system" and power electronization, in order to effectively reduce the risk of large-scale power outages in power grid, it is necessary to build a secure and reliable comprehensive defense system to ensure the stable operation of the power system. Based on the traditional three defense lines in China, the objectives and design principles of the UHV AC and DC power grid security defense system that adapt to the dual carbon background of China's power grid were determined, and designed the overall structure of the UHV AC/DC power grid security defense system, main functions and specific configuration schemes.

Key words: hybrid power grids; comprehensive defense system; three defense lines; configuration schemes

电网安全关系到社会经济发展,各方都极为重视电网安全问题^[1]。为满足电网负荷飞速持续增长需要,目前我国正在构建的全球最大、电压最高的特高压交/直流电网的特性与传统电网相比发生了很大改变^[2-6]。当前特高压电网具有“强直弱交”和电力电子化新特点^[7-11]。针对这一电网新特点和双碳背景下的新形势,在原有的传统三道防线的基础上,构建安全可靠的电力系统安全综合防御体系。文献[12]研究了特高压交直流电网系统保护及其关键技术,文献[13-14]提出了西南电网系统保护总体框架,文献[15]和文献[16]分别提出了华北电网和东北电网系统保护总体方案,研究明显减小电网停电风险的相关措施,确保我国电网安全平稳运行^[17-18]是当前发展面临

的紧迫问题^[19]。

本文确定了双碳背景下特高压交直流电网安全防御系统应具有的目标和设计原则。

1 电网安全控制概论

1.1 电网运行状态

电网运行状态转换与实施的控制措施间的关系如图1所示^[20]。

1.2 电网的三道防线

“三道防线”是对电网应具备的抗大故障扰动能力的通俗形象的说法^[21-22]。电网保护三道防线包括:第一道防线(主要应对第1级安全稳定标准);第二道防线(主要应对第2级安全稳定标准);第三道防线(主要应对第3级安全稳定标准)。

基金项目:国网重庆市电力公司科技项目(SGCQ0000DKJS2200018)

作者简介:古济铭(1976—),男,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为电力系统计算分析、运行与控制技术,Email:lf_706@126.com

电力系统的三道防线时序关系如图2所示。

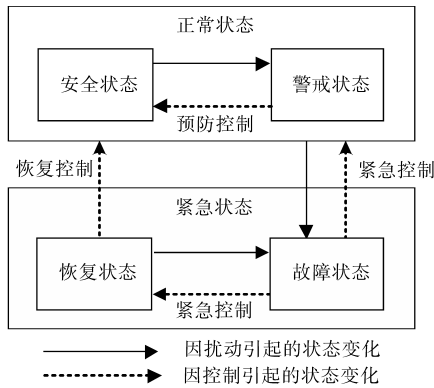


图1 电网运行状态转变关系图

Fig.1 Relationship diagram of power grid operation state transition

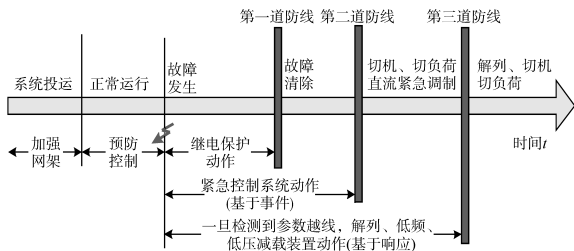


图2 电力系统三道防线时序图

Fig.2 Sequence diagram of three defense lines of power system

2 双碳背景下特高压电网安全防御系统目标和设计原则

2.1 特高压交直流电网安全防御的目标

特高压交直流电网安全防御是以有效降低电网运行风险为目标,创建多目标控制、多资源协同和多时间尺度协调的高安全可靠性的电网安全综合防御系统。

电网安全稳定综合防御的内涵如图3所示。从图3中可以看出,电网安全防御主要包括目标维度、时间维度和空间维度三个维度方面的协调控制。

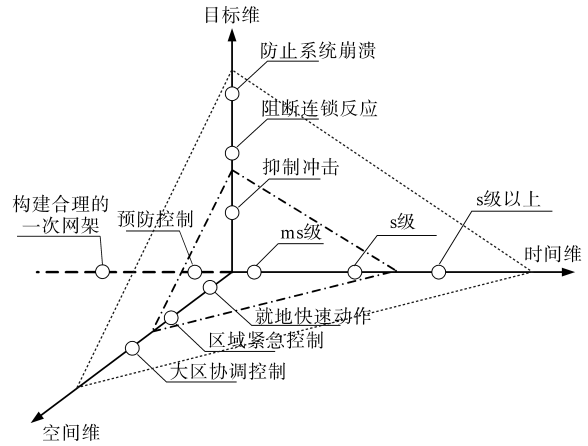


图3 电网安全防御的内涵

Fig.3 Connotation of power grid security defense

1) 电网安全防御的目标如图4所示。

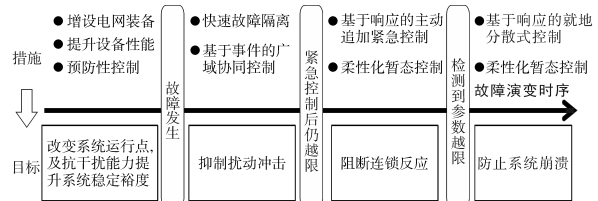


图4 电网安全防御的目标

Fig.4 Goal of grid security defense

2) 电网安全防御全时段控制如图5所示。

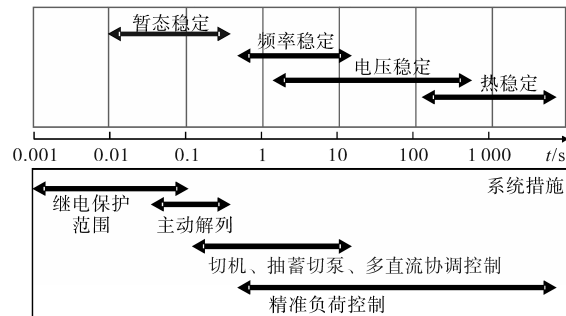


图5 电网安全防御全时段控制

Fig.5 Full-time control of power grid security defense

3) 电网安全防御空间维度协调控制如图6所示。

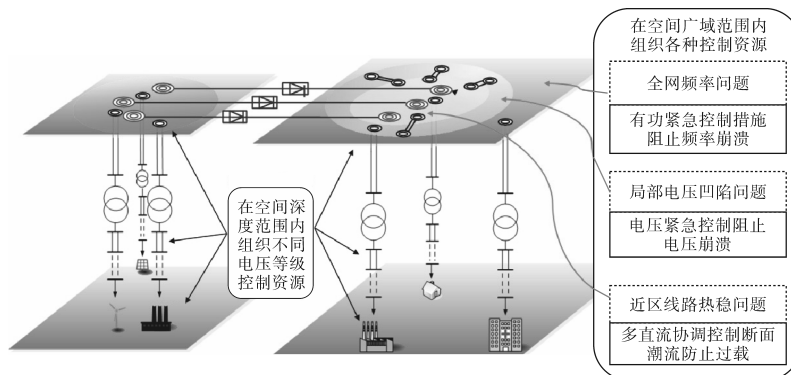


图6 电网安全防御空间维度协调控制

Fig.6 Coordinated control of power grid security defense space dimension

2.2 特高压交直流电网安全防御与三道防线的关系

电网的安全防御主要依赖三道防线。为了保障不同发展阶段电网的安全稳定运行,需同步规划建设电网安全稳定综合防御系统。随着特高压交直流电网运行特性的变化,原有面向传统电网的三道防线防控体系已无法有效保障电网稳定运行。

建成新的特高压混联电网安全防护架构包括以下几点:

1) 巩固第一道防线。一是通过提高设备本体可靠性,优化控制保护系统,完善设备涉网性能,降低故障发生概率;二是通过研究应用交流保护新技术增强交直流混联电网抵御故障能力。

2) 加强第二道防线。协同源网荷各控制资源和新控制措施,针对离线决策模式的缺陷,在保证不影响离线决策方案可靠性的前提下,研究适应电网运行方式多变的控制策略决策模式,实现基于事件引发和基于响应的主动紧急控制,防止系统失去稳定。

3) 拓展第三道防线。扩展控制资源类型,通过检测电气量越限的分散就地控制,阻止故障蔓延,减少负荷损失,防止系统崩溃。

2.3 特高压交直流电网安全防御系统设计原则

设计特高压交直流电网安全防御系统,应遵循以下三项总体原则:

1) 电网安全防御应适应我国电网“强直弱交”特性和新能源快速发展带来的新特性,按照不同区域电网进行电网安全防御差异化设计。

电网安全防御系统以区域电网为实施主体,区域电网安全防御系统功能设置,应立足于本区域电网稳定控制需求,兼顾跨区域电网间的协调控制。

2) 以原有的三道防线体系为基础,重点针对能量冲击强、扰动区域大的扰动,全面扩展三道防线,合理提高防御标准,防范特高压电网跨网风险。

3) 电网安全防御系统应建设独立的可靠性高的专有通信网,保障控制的稳定高速和安全可靠性,避免二次系统通信故障威胁主网安全。

3 双碳背景下特高压电网安全防御系统总体架构及功能

3.1 特高压交直流电网安全防御系统定位

电网的运行控制包括稳态运行控制和故障情况下的紧急控制。正常运行时,主要基于智能电网调度技术支持系统(D5000)对电网实施稳态运行控制;故障情况下,主要基于三道防线部署的各种控制措施,实施电网的紧急控制。目前,依靠三道防线配置的紧急控制措施,遵循就地、分散原则,控制目标明确,根据局部问题或单一工程进行设计和部署,各控制系统之间无关联。

根据中国电网目前面临的挑战与困难,除智能电网综合调度支撑体系(D5000)实现全面稳态监视和控制外,还应平行建立独立的实时、紧急、闭环的电网安全综合防控系统。特高压交直流电网安全防御系统定位如图7所示。

电网安全防御系统应具备实时性、安全性、可靠性及可扩展性。

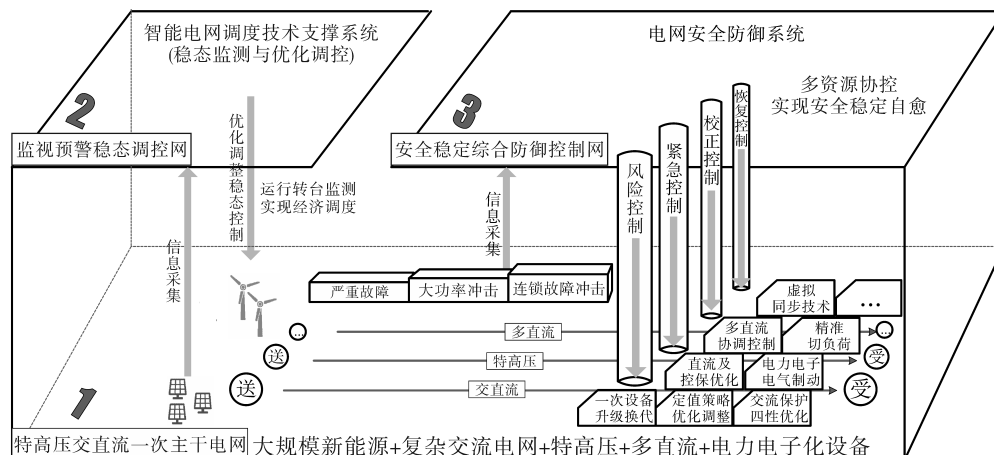


图7 特高压交直流电网安全防御系统定位

Fig. 7 Positioning of UHV AC and DC grid security defense system

3.2 特高压交直流电网安全防御系统总体架构

依托先进的通信技术,电网安全防御系统总

体架构如图8所示。

总体功能模块分别介绍如下:

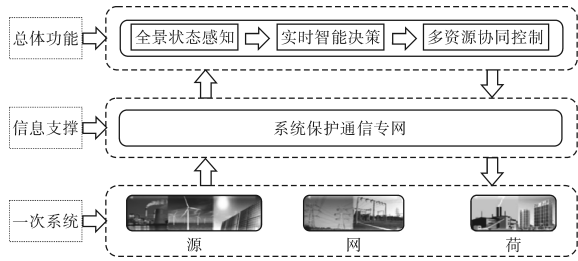


图8 电网安全防御系统总体功能需求及架构

Fig.8 Overall functional requirements and architecture of the power grid security defense system

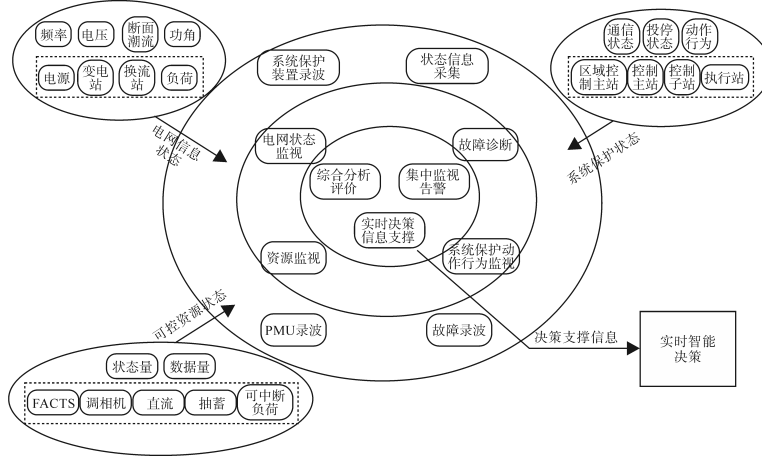


图9 全景状态感知模块

Fig.9 Panoramic state perception module

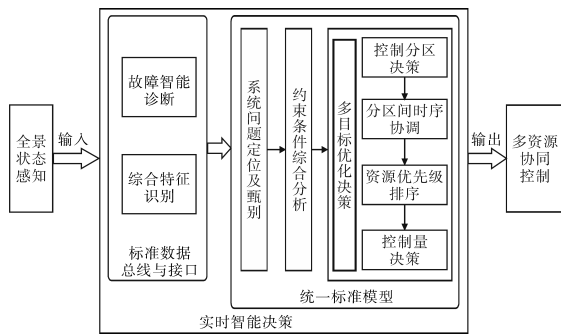


图10 实时智能决策模块

Fig.10 Real-time intelligent decision-making module

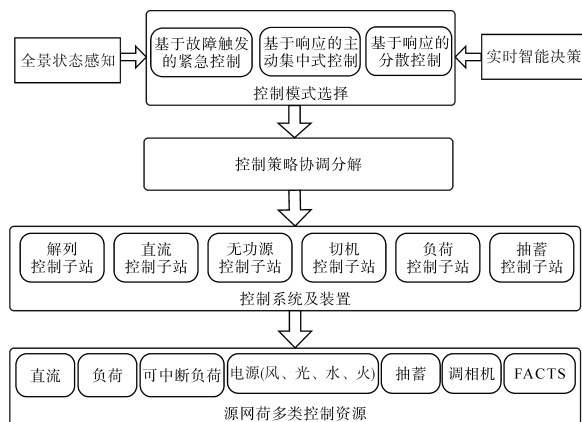


图11 多资源协同控制模块

Fig.11 Multi resource cooperative control module

1)全景状态感知。电网安全防御系统全景状态感知模块如图9所示。

2)实时智能决策。电网安全防御系统实时智能决策模块如图10所示。

3)多资源协同控制。电网安全防御系统多种资源协同控制模块如图11所示。

3.3 特高压交直流电网安全防御系统详细功能

电网安全防御系统提供标准化的功能体系,分为核心功能库与扩展功能库,涵盖了电网三道

防线。其中,核心功能库提供最基础的电网安全防御功能;扩展功能库在源、网、荷三大领域提供更为丰富完整的功能,不同电网可根据自身特点和需求进行选用。电网安全防御系统的标准化功能库如图12所示。

	核心功能包		扩展功能包		
	源	网	源	网	荷
第一道	站域失灵加速 直流控保优化 多频振荡监测	重合闸优化 调速器优化 网源协调监视	<input checked="" type="checkbox"/> 火电扭振抑制 <input checked="" type="checkbox"/> 风机参数优化 <input checked="" type="checkbox"/> 新能源无功预控	<input checked="" type="checkbox"/> 过负荷自适应 <input checked="" type="checkbox"/> 励磁涌流抑制 <input checked="" type="checkbox"/> 直流FC <input checked="" type="checkbox"/> 直流阻尼控制	<input checked="" type="checkbox"/> 负荷实测建模
第二道	直流快速控制 抽蓄切泵	全网优化切机 调相机控制 FACTS控制	<input checked="" type="checkbox"/> 火电快关汽门 <input checked="" type="checkbox"/> 水电快调导叶 <input checked="" type="checkbox"/> 精益切风机 <input checked="" type="checkbox"/> 过压切汇集线	<input checked="" type="checkbox"/> 主动解列 <input checked="" type="checkbox"/> 低容低抗快控	<input checked="" type="checkbox"/> 精准负荷控制
第三道	低频减载优化 失步解列优化	低压减载优化	<input checked="" type="checkbox"/> 高周切机优化 <input checked="" type="checkbox"/> 次同步切风机	<input checked="" type="checkbox"/> 多级断面快解	<input checked="" type="checkbox"/> 精准低频减载 <input checked="" type="checkbox"/> 精准低压减载

图12 电网安全防御系统标准功能库

Fig.12 Standard function library of power grid security defense system

3.4 特高压交直流电网安全防御系统配置方案

电网安全防御系统以区域控制主站为核心,主站与子站均采用双套配置方案,自上而下分层接入,并按控制资源不同分类控制,采用顶层集

中协调与就地执行结合的硬件架构,电网安全防御系统配置方案如图13所示。

区域控制主站、各类子站、执行站装置间通过保护专用信息网实现互联及信息交互。不同区域

控制主站之间,依据协调控制实际需要,进行连接与通信。各区域控制主站,就地稳控主站、子站、执行站,精细切负荷子站以及其它类型控制子站,共同构成电网安全防御系统可靠的硬件支撑体系。

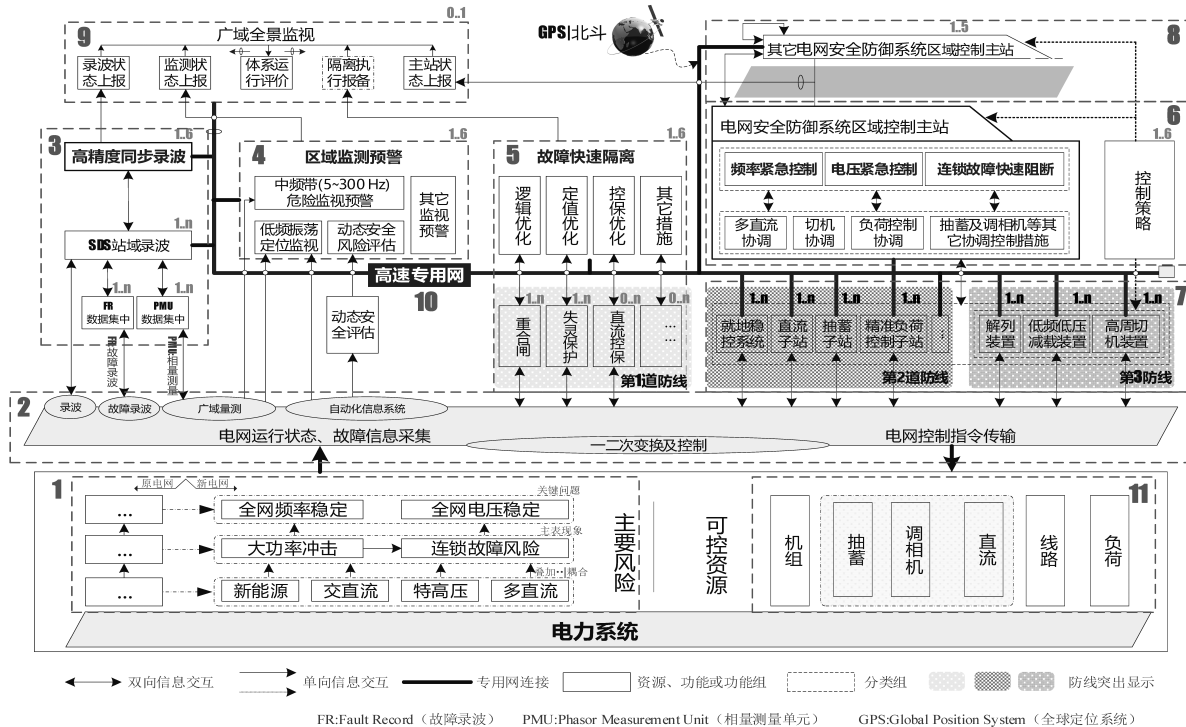


图13 特高压交直流电网安全防御系统配置方案

Fig.13 Configuration scheme of UHV power grid security defense system

4 结论

针对双碳背景下我国特高压交直流电网具有的“强直弱交”和电力电子化特征的新形势,在原有的三道防线的基础上,设计了特高压交直流电网安全防御系统的总体架构、主要功能和具体的配置方案。可有效降低电网停电风险,有助于确保我国电网安全稳定运行。

参考文献

- [1] 汤涌. 电力系统安全稳定综合防御体系框架[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 1-5.
TANG Yong. Framework of comprehensive defence architecture for power system security and stability[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 1-5.
- [2] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 986-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 986-991.
- [3] 宋云亭, 郑超, 秦晓辉. 大电网结构规划[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 1-5.

SONG Yunting, ZHENG Chao, QIN Xiaohui. Large power network structure planning[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2013: 1-5.

- [4] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 2513-2522.
ZHAO Wanjun. HVDC transmission engineering technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 2513-2522.
- [5] 刘振亚, 张启平, 董存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513-2522.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [6] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [7] 李勇. 强直弱交区域互联大电网运行控制技术与分析[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3756-3760.
LI Yong. Technology and practice of the operation control of large power grid connected with weak ac area[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3756-3760.

- [8] 袁小明,程时杰,胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154.
- [9] 王梅义,吴竟昌,蒙定中. 大电网系统技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991: 176-179.
WANG Meiyi, WU Jingchang, MENG Dingzhong. Large electric power network system technology[M]. Beijing: Hydraulic Power Press, 1991: 176-179.
- [10] 郑超,汤涌,马世英,等. 直流参与稳定控制的典型场景及技术需求[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3750-3759.
ZHENG Chao, TANG Yong, MA Shiyong, et al. A survey on typical scenarios and technology needs for HVDC participated into stability control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3750-3759.
- [11] SHU Yinbiao, CHEN Guoping, YU Zhao, et al. Characteristic analysis of UHVAC/DC hybrid power grids and construction of power system protection[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 325-333.
- [12] 陈国平,李明节,许涛. 特高压交直流电网系统保护及其关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 2-10.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao. System protection and its key technologies of UHV AC and DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 2-10.
- [13] 李超,颜云松,熊俊,等. 西南电网交直流协调控制系统设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 200-206.
LI Chao, YAN Yunsong, XIONG Jun, et al. Design and application of AC/DC coordinated control system in southwest power grid of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 200-206.
- [14] 董昱,张鑫,余锐,等. 水电汇集多直流弱送端电网稳定控制及系统保护方案[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 19-25.
DONG Yu, ZHANG Xin, YU Rui, et al. Stability control and system protection scheme for power grid with hydropower pool and multi-DC weak sending-end[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 19-25.
- [15] 罗亚洲,陈得治,李轶群,等. 华北多特高压交直流强耦合大受端电网系统保护方案设计[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 11-18.
LUO Yazhou, CHEN Dezhi, LI Yiqun, et al. Design of system protection scheme for North China multi-UHV AC and DC strong coupling large receiving-end power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 11-18.
- [16] 邵广惠,侯凯元,王克非,等. 特高压直流闭锁引发送端电网过频的系统保护方案[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 26-31.
SHAO Guanghui, HOU Kaiyuan, WANG Kefei, et al. System protection scheme for over frequency of sending-end power grid caused by ultra-HVDC blocking[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 26-31.
- [17] 杨海涛. 大规模高压交直流混联电网安全监控方案探讨[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 17-21.
YANG Haitao. A scheme of supervisory control system for large scale HVAC/HVDC hybrid power grid security[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 17-21.
- [18] 杨海涛,吉平,任远,等. 特高压电网安全监控功能和技术需求分[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3741-3748.
YANG Haitao, JI Ping, REN Yuan, et al. Analysis on functional and technical requirements of UHV power grid security supervision and control[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3741-3748.
- [19] 郭小江,马世英,申洪,等. 大规模风电直流外送方案与系统稳定控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 107-115.
GUO Xiaojiang, MA Shiyong, SHEN Hong, et al. HVDC grid connection schemes and system stability control strategies for large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 107-115.
- [20] 宋云亭,陈得治,张保会,等. 基于响应的电网紧急控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019: 1-5.
SONG Yunting, CHEN Dezhi, ZHANG Baohui, et al. Response-information based emergency control for power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2019: 1-5.
- [21] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 电力系统安全稳定导则: DL 755—2001[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
State Economic and Trade Commission of the People's Republic of China. Guide on security and stability for power system: DL 755—2001[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [22] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994.

收稿日期:2023-06-20

修改稿日期:2023-08-24