

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210269

调控系统中统一潮流控制器稳态建模的实现

罗玉春^{1,2,3}, 王毅^{1,2,3}, 闪鑫^{1,2,3}, 戴则梅^{1,2,3}, 陆娟娟^{1,2}

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 3. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106)

摘要: 结合国内统一潮流控制器示范工程介绍了 UPFC 基本结构。根据目前调控系统的实际建设情况, 设计了在调控系统建立统一潮流控制器稳态物理模型、量测采集模型的实现方式。将采用节点附加注入功率的 UPFC 模型应用于调控系统中在线运行的状态估计、调度员潮流、静态安全分析等高级应用软件, 提出了计及 UPFC 的调控系统高级应用软件的实现方法。最后介绍了基于 CIM/E、CIM/G 标准在上下级调控中心之间及内部建立和共享 UPFC 模型、图形的具体实现方式。通过在 D5000 的实际应用, 证明了所述方法的有效性和实用性。

关键词: 统一潮流控制器; 稳态模型; 状态估计; 潮流计算; 静态安全分析; 模型共享

Realization of steady state modeling of unified power flow controller in a control system

LUO Yuchun^{1,2,3}, WANG Yi^{1,2,3}, SHAN Xin^{1,2,3}, DAI Zemei^{1,2,3}, LU Juanjuan^{1,2}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 2. NARI Technology Development Limited Company, Nanjing 211106, China; 3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

Abstract: The basic structure of UPFC is introduced in combination with demonstration projects of the unified power flow controller in China. According to the actual construction of dispatching control system, the realization of the steady state physical model and measurement acquisition model of the unified power flow controller in dispatching control system are designed. The mathematical models of UPFC based on equivalent power injection are applied to on-line advanced application softwares of dispatching control system such as state estimation, dispatcher power flow and static security analysis. The implementation methods of these advanced application softwares considering UPFC are proposed. Finally, it introduces the specific implementation of the UPFC model and graphics sharing between superior and subordinate dispatching centers and within dispatching centers based on CIM/E and CIM/G standards. Through the practical application of D5000, the effectiveness and practicability of this method are proved.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5108-202040024A).

Key words: UPFC; steady-state model; state estimation; power flow calculation; static security analysis; model sharing

0 引言

随着我国社会经济的发展,特高压工程的建设,东部负荷中心区外来电、光伏风电等新能源装机规模大幅增长,电网在发展过程中面临如下问题:新能源具有波动性、随机性,区外来电随季节性变化,使得电网潮流分布不均、关键输电断面输电能力不足,潮流复杂多变难以控制,动态无功支撑能力不

足^[1-2]。另外一方面,随着社会城市化的发展,电网建设占用土地、环境资源的矛盾日益突出,导致建设新的输电走廊变得异常困难,再加上工程投资非常高昂,甚至无法实施。

统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)是灵活交流输电系统家族中最有代表性的控制器,通过对交流系统中的电压、电抗及相角等参数进行灵活控制,进而实现对交流系统的潮流、电压控制,提高功率传输极限,抑制电力系统低频振荡,改善系统暂态稳定性^[3-7]。国网江苏省电力有限公司在 2013 年启动了南京 220 kV 西环网应用统一

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助“特高压交直流混联电网故障协同处理关键技术研究”(5108-202040024A)

潮流控制器的研究工作并于 2015 年建成投产, 在 2016 年开工建设苏州南部电网 500 kV 统一潮流控制器示范工程并于 2017 年底投运^[8]。

在统一潮流控制器稳态建模方面, 通常采用等效电源的方法进行建模^[9-18]。文献[9-11]提出节点附加注入功率模型, 实现 UPFC 与电力系统解耦, 在计算过程中只需要对雅可比矩阵作少量修正, 潮流计算过程和不含 UPFC 时基本相同。文献[12]在传统状态估计模型基础上, 利用 UPFC 的功率注入模型, 将其对状态估计的影响转移到所在线路两侧的节点上, 提出了计及 UPFC 的状态估计模型。该方法可以完整计及 UPFC 对电力系统的影响, 但需要采集并联可控电流源、串联可控电压源的幅值和相角。文献[13-14]基于 Matlab 的电力系统仿真工具箱建立了统一潮流控制器稳态及动态模型, 由于 Matlab 是美国公司的商业软件, 在国内使用存在“卡脖子”问题。文献[15]对统一潮流控制器潮流模拟计算采用电流源模拟并联逆变器、电压源模拟串联变压器, 这种建模方式保证了 UPFC 串并侧的有功平衡, 但并联侧采用电流源无法描述并联逆变器的电压幅值和相角, 因此该模型并不适合潮流求解。潮流和机电暂态建模是电力系统安全分析的基础, 需要将 UPFC 模型纳入电网统一模型中, 但现有的电力系统仿真软件中没有现成的 UPFC 模型。为了将 UPFC 嵌入到电力系统分析软件中, 文献[16-18]通过电力系统分析综合程序的用户自定义模型/用户程序接口分别构造了 UPFC 的自定义模型, 建立了 UPFC 的潮流计算模型, 并编写了求解所建模型的用户程序。

电网调度控制系统作为电网的“神经中枢”系统, 对保障电网安全、稳定、经济运行极其重要。在调控系统中实现对统一潮流控制器的建模、监视控制以及考虑 UPFC 的电网稳态分析计算重要性不言而喻。在前人理论研究的基础上, 本文结合目前调控系统的实际建设运行情况, 研究了调控系统统一潮流控制器稳态建模实现方式, 将基于节点附加注入功率的 UPFC 数学模型与调控系统中在线运行的状态估计、调度员潮流、静态安全分析模块功能相结合, 实现了调控系统 UPFC 的稳态建模及软件功能开发, 并阐述了在调控系统内部及之间共享 UPFC 模型、图形的实现方式。在智能电网调度技术支持系统 D5000 的实际应用中, 验证了本文所提方法的正确性和有效性。

1 UPFC 基本结构

典型的 UPFC 基本结构如图 1 所示, 两个电压

源换流器通过公用的直流电容连接, 可实现两者之间的有功双向流动, 并分别通过变压器接入交流系统。换流器 1 和变压器 1 统称为并联侧, 换流器 2 和变压器 T2 统称为串联侧。

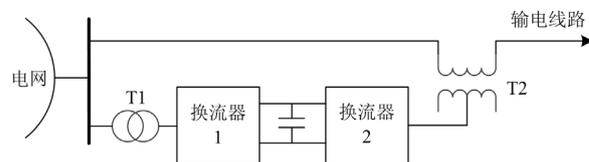


图 1 UPFC 系统典型结构图

Fig. 1 Structure of typical UPFC

UPFC 串联变压器接线组别采用 III/Yn/△接法, 网侧绕组通过 III 连接组别分相串联在线路中, 接入点为线路断路器后靠近线路侧。UPFC 并联变压器为常规变压器, 主要作用是将并联侧换流器与交流系统隔离, 接线组别一般采用 Yn/Y/△接法。

我国 220 kV 及以上电压等级线路大部分采用双回线路结构, 已经投运的南京 220 kV 西环网 UPFC 示范工程和苏州南部电网 500 kV UPFC 示范工程 UPFC 安装的线路都为双回线, 采用串联侧换流器工作在静止同步串联补偿器(SSSC)方式用来补偿线路参数, 并联侧换流器工作在静止同步补偿器(STATCOM)方式控制节点电压幅值, 其中南京示范工程 UPFC 并联侧采用线变组接线方式接入相邻的 220 kV 燕子矶变电站 35 kV 母线。

2 调控系统中 UPFC 稳态模型

2.1 稳态物理模型

根据 UPFC 基本结构, 设计调控系统中 UPFC 稳态分析对应的物理模型。在调控系统中新建串联变压器表和串联变压器绕组表用于描述 UPFC 串联变压器模型, UPFC 并联变压器、换流器采用调控系统中已有的变压器表、变压器绕组表、换流器表进行建模, 新建 UPFC 系统表用于表示 UPFC 工程模型, 统一描述 UPFC 串联部分、并联部分以及多回线 UPFC 模型之间的关系。

UPFC 系统表主要描述 UPFC 系统基本信息, 如厂站、电压等级等。同一变电站控制同一输电断面的 UPFC 设备属于同一 UPFC 系统, 如双回线路 UPFC 属于同一 UPFC 系统。

UPFC 串联变压器模型通过串联变压器表描述, 基本属性有: 名称、厂站、额定容量、变压器类型、所属 UPFC 系统、空载损耗等。

串联变压器绕组表根据串联变压器记录通过数据库触发器触发生成, 描述串联变压器线组的信息。

除了物理设备基本的属性外, 本文设计了 UPFC 稳态控制功能需要的属性, 如 UPFC 控制线路、调节容量范围、UPFC 控制模式、有功启动限值等。

在 UPFC 稳态分析中, 由于 UPFC 既不吸收也不发出有功功率, 计算不涉及 UPFC 换流器触发角、直流电压等, 但为了稳态分析中能够模拟 UPFC 换流器开断计算分析, 在 UPFC 稳态分析中需要对 UPFC 换流器进行建模。UPFC 换流器可以复用调控系统已经建立的换流器模型, 无需新建模型表对 UPFC 换流器模型进行描述, 为了程序实现的便利, 在已有的换流器表中新增字段描述换流器所连接的变压器。

目前根据已经开发的功能需求, 设计了调控系统中 UPFC 设备表结构的字段, 包含 UPFC 物理设备基本信息和稳态控制分析功能需要的信息。对于后续功能开发需要的字段可以在此基础上进行补充完善。

2.2 量测采集模型

当建立上述 UPFC 稳态物理模型时, 需要同步建立对应的 UPFC 量测模型, 典型的 UPFC 交流侧采集量测包含 UPFC 串并联变压器各侧功率、电压、电流量测以及控制线路的功率、电流量测。当对 UPFC 串联变压器进行建模时, 采用触发器新增设备事件实现 UPFC 设备在前置遥测定义表生成其各个量测域的前置遥测定义表记录, 根据设计的调控系统 UPFC 设备表结构中串联变压器绕组表中定义的域号和串联变压器绕组 ID 生成各个量测唯一的遥测定义表记录关键字, 由调度自动化运维人员维护各量测的采集点号。UPFC 并联变压器量测采集模型和调控系统中已有的变压器量测采集模型一致, 无需增加新的量测采集模型类型。

3 计及 UPFC 的电力系统高级应用软件

目前调控系统中在线运行的稳态计算功能, 包括状态估计、潮流计算、静态安全分析等功能都不支持对 UPFC 串联电压源的处理。为了有效复用调控系统中已有的程序, 同时最大程度地减小对调控系统中已建设功能的影响, 需要对已有的高级应用程序进行修正以计及 UPFC 的影响。

目前, 学者提出了多种 UPFC 的稳态数学模型, 如节点等效注入功率模型、阻抗模型及通用的电压源模型。本文采用功率注入法, 通过数学等效处理将串联电压转化为功率注入形式, 将 UPFC 对线路潮流的影响转移到线路的两端节点上, 不用新增节点, 不影响导纳矩阵的对称性, 可以有效复用已有的节点排序、雅可比矩阵形成、迭代计算等程序,

将 UPFC 控制作用嵌入已有的程序, 从而便于实现计及 UPFC 的高级应用分析软件。

3.1 计及 UPFC 的状态估计软件

目前, 调度控制系统中运行的状态估计程序普遍采用基于加权最小二乘原理的快速分解状态估计, 通过求解目标函数式(1)达到最小值时的 \mathbf{x} 值实现状态估计计算功能^[19]。

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

式中: \mathbf{z} 为量测矢量; \mathbf{h} 为非线性量测函数; \mathbf{R} 为量测误差方差阵; \mathbf{x} 为系统状态量。

与常规的状态估计相比, 计及 UPFC 的状态估计主要考虑 UPFC 对量测方程的影响, 同时能够根据 UPFC 的接线结构进行遥信预处理。

3.1.1 网络拓扑错误辨识

网络拓扑的正确性直接决定状态估计分析结果的正确性。拓扑错误辨识功能作为状态估计软件的基本功能, 在安装 UPFC 设备后需要能够根据 UPFC 的运行方式进行遥信状态辨识。典型的 UPFC 串联变压器接入电网的连接关系如图 2 所示, UPFC 串联侧接有隔离刀闸和串联变压器旁路开关, 用于调整 UPFC 投运状态以及在 UPFC 设备发生故障时进行故障隔离。UPFC 串联变压器投入运行时, Break1、Break2 为合状态、Break3 为分状态。UPFC 串联变压器退出运行且线路投入运行时, Break1、Break2、Break3 均为合状态。

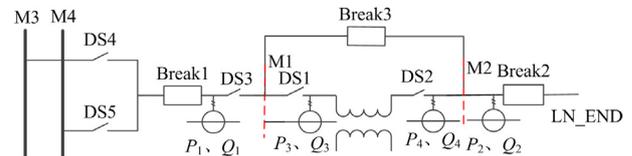


图 2 典型 UPFC 串联侧接线方式

Fig. 2 Typical connective mode of UPFC series side

目前调度控制系统中拓扑状态辨识功能普遍采用专家规则法进行遥信错误辨识, 具有快速、简单、有效、可靠的特点^[20-21]。UPFC 并联变压器接线方式和传统的变压器接线方式基本类似, 可以直接复用已有的基于专家规则法的网络拓扑辨识规则。对于 UPFC 串联变压器而言, 由于串联在交流线路中需要新增专家规则实现对 UPFC 串联变压器相关的断路器隔离开关遥信状态进行拓扑错误辨识, 新增的专家规则如表 1 所示。

为了避免在不同运行方式下辨识 DS1、DS2、DS3、DS4、DS5、Break1、Break2、Break3 的相互影响, 在旁路断路器两侧增加虚拟母线, 如图 2 中 M1、M2 所示。对串联变压器绕组, 从其两侧基于

表 1 UPFC 串联变压器网侧遥信状态判断规则
Table 1 State judgment rules of series transformer
grid side of UPFC

开关/ 刀闸	UPFC 串联变压器 投入运行时	UPFC 串联变压器 退出运行时
Break1	根据量测 P1、Q1 有效性 (大于零漂门槛, 质量码有效)处理 Break1 状态	根据量测 P1、Q1 有效性 处理 Break1 状态
Break2	根据量测 P2、Q2 有效性 (大于零漂门槛, 质量码有效)处理 Break2 状态	根据量测 P2、Q2 有效性 处理 Break2 状态
Break3	根据 P3、Q3(大于零漂门 槛, 质量码有效)或者 P4、 Q4(大于零漂门槛, 质量 码有效)处理 Break3 状态	根据 P3、Q3 有效性(小于 零漂门槛, 质量码有效) 并且 P4、Q4(小于零漂门 槛, 质量码有效)处理 Break3 状态
DS1	根据量测 P3、Q3 有效性 (大于零漂门槛, 质量码有 效)处理 DS1 状态	根据量测 P3、Q3 有效性 (小于零漂门槛, 质量码有 效)处理 DS1 状态
DS2	根据量测 P4、Q4 有效性 (大于零漂门槛, 质量码有 效)处理 DS2 状态	根据量测 P4、Q4 有效性 (小于零漂门槛, 质量码有 效)处理 DS2 状态
DS3	根据量测 P1、Q1 有效性 (大于零漂门槛, 质量码有 效)处理 DS3 状态	根据量测 P1、Q1 有效性 处理 DS3 状态

注: 零漂门槛取 UPFC 串联变压器绕组所在电压等级功率基准值^[22]设
定的门槛百分比。

物理节点号向外搜索至虚拟母线 M1、M2, 搜索到 DS1、DS2; 从母线 M3/M4 搜索至虚拟母线 M1, 搜索到 DS4/DS5、Break1、DS3; 从交流线端 LN_END 搜索至虚拟母线 M2, 搜索到 Break2。将 UPFC 串联变压器两侧采集的电压值直接关联到虚拟母线 M1、M2 上, 用于 UPFC 设备在电气岛和电压量测的双重校验。

3.1.2 估计模型

文献[12]采用功率注入模型, 串联部分和并联部分分别采用串联可控电压源和并联可控电流源进行等效, 在进行节点注入功率转换时, 将 UPFC 串联可控电压源电压幅值相角、并联可控电流源电流幅值和相角作为已知量测纳入量测方程及雅可比矩阵的计算。但在实际调控系统中, UPFC 串联电压源和并联电流源的相对相角没有采集传送到调度主站, 并且普遍采用基于 SCADA 的量测数据进行状态估计计算, 该种模型不适合嵌入调控系统中已经投入在线运行的状态估计计算模型。本文采用简单实用的节点附加注入功率计算模型, 如图 3 所示。

在 UPFC 运行时, SCADA 采集处理的量测包含 UPFC 线路首末端功率 P_s 、 Q_s 、 P_m 、 Q_m , UPFC 串联变压器两侧功率 P' 、 Q' 、 P'_s 、 Q'_s , UPFC 并

联变压器从节点 i 吸取的功率 P'_i 、 Q'_i 、电压 V_i 、 V_s 、 V_m 、 V' 以及流经 Break1 的功率 P_i 、 Q_i 。

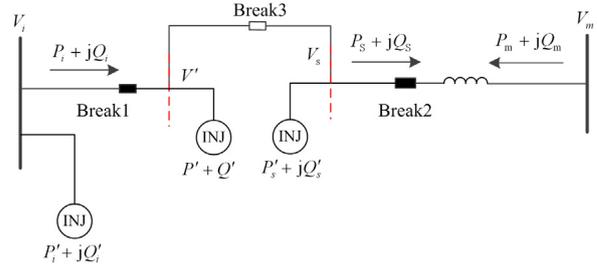


图 3 含 UPFC 的状态估计等值电路

Fig. 3 State estimation equivalent circuit with UPFC

在估计模型中, 将 UPFC 串联变压器两侧功率 P' 、 Q' 、 P'_s 、 Q'_s 、并联侧功率 P'_i 、 Q'_i 作为等效注入功率, 流经 Break1 的功率 P_i 、 Q_i 在 UPFC 运行时不加入估计量测方程, 线路量测和电压量测采用常规的处理方法即可。这样, 通过节点附加注入功率的方式, 实现了计及 UPFC 的状态估计计算, 该种计算方式非常便于将 UPFC 嵌入现有调控系统中运行的状态估计程序, 不改变已有状态估计的计算流程。在计算遥测估计合格率时 UPFC 功率量测基值采用 UPFC 串联线路电压等级的基准值^[22]。

在程序实现时, 使用文献[23]中所述方法基于多线程并行计算技术实现大规模电网快速分解状态估计有功、无功信息矩阵中稀疏矩阵乘法运算及其因子分解, 以提高状态估计的计算速度。

3.2 计及 UPFC 的调度员潮流软件

3.2.1 功率方程

UPFC 在潮流计算中的主要应用领域是控制电网潮流, 在调度员潮流计算软件使用过程中, 调控运行人员一般只关心 UPFC 对线路潮流、母线电压的控制效果, 而不关心 UPFC 内部控制变量的值。文献[18]在潮流计算中把 UPFC 串联控制变量作为状态量, 存在迭代初值选取不合适导致潮流不易收敛的问题。本文在调度员潮流计算功能中采用设定控制目标法, 通过设定线路潮流的控制目标, 在潮流计算收敛后计算获得 UPFC 的控制参数。这种方法对于调控运行人员来说, 通过设置控制目标满足了其使用需求。

忽略 UPFC 串联变压器的等值电抗, 装有 UPFC 线路的等值电路如图 4 所示。设 UPFC 控制线路末端功率为 $P_c + jQ_c$, 则有 $P_m + jQ_m = P_c + jQ_c$ 。由于 UPFC 既不吸收也不发出有功功率, 则采用极坐标系下的节点 i 有功 P_i 和无功 Q_i 可表示为

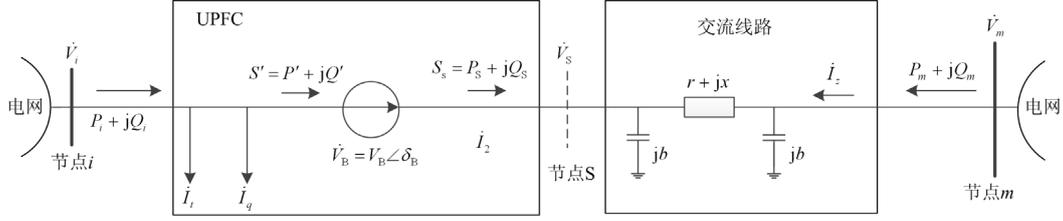


图4 含 UPFC 的单回输电线路等值电路

Fig. 4 Equivalent circuit of single transmission line with UPFC

$$\begin{cases} P_i = -P_m + \left[\frac{P_m^2 + Q_m^2}{V_m^2} + 2bQ_m + b^2V_m^2 \right] r \\ Q_i = -V_i I_q - V_i [A \sin \theta_{im} - B \cos \theta_{im}] \end{cases} \quad (2)$$

式中： θ_{im} 为节点*i*、*m*电压相角差；*A*、*B*为变量 V_m 、 P_m 、 Q_m 的表达式；其他物理量含义如图4中所示。

UPFC从节点*m*吸收的功率为UPFC线路传输功率控制目标，这样可以用交流节点电压和支路功率表示UPFC从节点*i*、*m*吸收的功率，与UPFC内部控制参数 \dot{V}_B 无关，UPFC及其所在的输电线路可以从系统移去并以附加节点注入功率的形式出现。

选取交流节点(不含节点*S*)电压为状态量，所以 V_B 与 δ_B 无需参加迭代计算，也就不存在设置 \dot{V}_B 迭代初值的问题，避免了选择 \dot{V}_B 作为状态量初值选取不当导致潮流不收敛的问题，对交流潮流计算仍可采用平启动或者使用状态估计结果作为初始值进行计算。在潮流计算收敛后计算线路首端节点电压 \dot{V}_S 和功率 S_s 。

在调控系统中普遍采用牛顿法或者快速分解法进行潮流问题的求解。本文以牛顿法为例说明采用节点注入功率模型的UPFC潮流计算问题，附加UPFC注入功率下后节点*i*、*m*功率偏差方程如式(3)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{is} - P_i - \sum_{j \in i} V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{is} - V_i I_q - \sum_{j \in i} V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta P_m = P_{ms} - P_m - \sum_{j \in m} V_m V_j (G_{mj} \cos \theta_{mj} + B_{mj} \sin \theta_{mj}) = 0 \\ \Delta Q_m = Q_{ms} - Q_m - \sum_{j \in m} V_m V_j (G_{mj} \sin \theta_{mj} - B_{mj} \cos \theta_{mj}) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $j \in i$ 表示节点*j*和节点*i*通过支路相连； P_{is} 、 Q_{is} 和 P_{ms} 、 Q_{ms} 分别为节点*i*、*m*的注入功率； V_i 、 V_j 、 V_m 分别为节点*i*、*j*、*m*的电压幅值； θ_{ij} 、 θ_{mj} 为节点*i-j*、*m-j*的角度差； G_{ij} 、 B_{ij} 为导纳矩阵中对应

的元素，节点*i*的无功方程中含有变量 I_q ，体现了UPFC的并联补偿功能独立于线路潮流控制。

3.2.2 雅可比矩阵修正及存储

基于式(3)模型进行求解，在UPFC投运时其所在线路被当作断开进行处理，则考虑UPFC附加节点注入功率对应的迭代方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_0 + H' & N_0 + N' \\ M_0 + M' & L_0 + L' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： H_0 、 N_0 、 M_0 、 L_0 为移去UPFC及其控制线路下的雅可比矩阵元素； H' 、 N' 、 M' 、 L' 为 P_i 、 Q_i 和 P_m 、 Q_m 引起的雅可比矩阵修正量。

在调控系统网络分析程序中，普遍采用基于数组的方法按行存储稀疏矩阵，由于考虑UPFC的附加节点注入功率，采用稀疏存储的雅可比矩阵数组中元素的下标需要同时修正。设潮流功率方程采用“PV节点-PQ节点”、状态量采用“PV节点-PQ节点-V θ ”节点顺序，每个PQ节点按照 $[\Delta \theta \ \Delta V/V]$ 进行编号。设PV、PQ节点数目分别为NUM_PV、NUM_PQ，节点*i*与NPV个PV节点相连，与NPQ个PQ节点相连，对端节点编号 $k \in (1, 2, \dots, NPV + NPQ)$ ，节点*i*出线度为NH，节点*i*对应的有功雅可比行 J_P 第1个非零元在雅可比矩阵稀疏存储数组YA中索引为IYA(*i*)，节点导纳矩阵每行对角元前面非零元的数目为NDA。

1) 节点*i*为PV节点

当节点*i*为PV节点时，节点*i*对应的 J_P 行的非零元个数为NPV+2NPQ，节点*i*+1对应的 J_P 行第1个非零元在YA索引为IYA(*i*)+NH+NPQ，此时节点*i*相关的雅可比矩阵元素在YA中索引如表2所示。

2) 节点*i*为PQ节点

当节点*i*为PQ节点时，节点*i*对应的 J_P 和 J_Q 非零元个数均为NPV+2NPQ。 J_P 行号PI为NUM_PV+2(*i*-NUM_PV)-1， J_Q 行号QI为NUM_PV+2(*i*-NUM_PV)。设节点*i*对应的 J_P 第1个非零元在YA中下标索引为IYA(PI)， J_Q 第1个非零元索引为IYA(QI)=IYA(PI)+NPV+2NPQ。此时节点*i*相关的

雅可比矩阵元素在 \mathbf{Y}_A 中索引如表 3 所示。

表 2 节点 i 为 PV 节点时雅可比矩阵元素索引

Table 2 Element index of Jacobian when i is PV node

J 元素	节点 k 为 PV 节点	节点 k 为 PQ 节点
H_{ii}		IYA(i)+NDA
H_{ik}	IYA(i)+ k	IYA(i)+ NPV+2 k -1
N_{ik}	—	IYA(i)+ NPV+2 k

表 3 节点 i 为 PQ 节点时雅可比矩阵元素索引

Table 3 Element index of Jacobian when i is PQ node

J 元素	节点 k 为 PV 节点	节点 k 为 PQ 节点
H_{ii}	IYA(PI)+NPV+NDA+2(NDA-NPV)-1	
N_{ii}	IYA(PI)+NPV+NDA+2(NDA-NPV)	
M_{ii}	IYA(PI)+NPV+NDA+2(NDA-NPV)-1	
L_{ii}	IYA(PI)+NPV+NDA+2(NDA-NPV)-1+ NPV+2NPQ	
H_{ik}	IYA(PI)+ k	IYA(PI)+NPV+2 k -1
N_{ik}	—	IYA(PI)+NPV+2 k
M_{ik}	IYA(QI)+ k	IYA(QI)+NPV+2 k -1
L_{ik}	—	IYA(QI)+NPV+2 k

雅可比矩阵稀疏数组 \mathbf{Y}_A 中非零元列号索引按照状态量排列的顺序号进行求解即可。

节点 m 的雅可比矩阵元素和不考虑 UPFC 线路时的雅可比矩阵一致。

对于双回 UPFC 线路, 每条 UPFC 线路等值电路使用和单回线 UPFC 线路等值电路一样的模型, 根据 UPFC 双回线的协调控制策略, 可分解得到单回线路 UPFC 从节点 m 吸取的功率 P_{m1} 、 Q_{m1} 和 P_{m2} 、 Q_{m2} (即单回线控制目标), 然后根据式(2)分别计算 P_{i1} 、 Q_{i1} 和 P_{i2} 、 Q_{i2} , UPFC 从节点 i 吸取的功率为 $P_{\Sigma} = P_{i1} + P_{i2}$ 、 $Q_{\Sigma} = Q_{i1} + Q_{i2}$ 。

对节点 i , 使用 P_{Σ} 、 Q_{Σ} 计算节点注入以及修正雅可比矩阵的元素值, 雅可比矩阵存储数组中元素索引号修正方法和单回线路实现方法一致。对于节点 m , 类似于单回线, 其雅可比矩阵和不考虑 UPFC 线路时的一样, 只是注入量使用目标常量 $P_{m1}+P_{m2}$ 和 $Q_{m1}+Q_{m2}$ 进行计算。

3.2.3 UPFC 控制方式

根据 UPFC 功率控制功能, 调度员潮流计算功能支持设置 UPFC 并联侧控制方式及串联侧控制方式。

UPFC 串联侧控制方式包括线路有功和无功控制, 可以人工设定双回线路/单回线路有功、无功目标值。软件支持的 UPFC 控制方式包括: 双回线功率控制、单回线功率控制, 并且两种控制方式可以相互切换。与独立的两条线路不同, 当采用双回线

功率控制模式时, 一般设置双回线上的功率一样。

UPFC 并联侧控制方式包括无功控制以及交流电压控制。在无功控制方式下, 设定 UPFC 发出或者吸收的无功功率值, 在交流电压控制方式下, 设定并联侧所连交流母线电压控制目标值, 此时节点 i 设为 PV 节点, 在潮流计算收敛后, 根据节点 i 的注入功率和支路功率计算得到 UPFC 并联侧吸收的无功功率。

需要特别说明, 在装设 UPFC 的双回线路上, 如果只对其中一条线路通过 UPFC 进行潮流控制, 另外一条线路不经 UPFC 控制直接接入电网。此时 UPFC 串联变压器(相当于一个串联电压源)通过双回线短路, 会在双回线及串联变压器间形成环流, 如图 5 所示, UPFC 控制潮流效果会非常差^[2]。

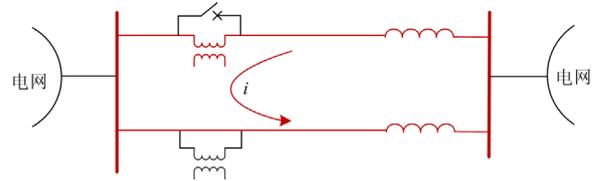


图 5 双回线 UPFC 只控制单线路潮流示意图

Fig. 5 Schematic diagram of double transmission line with UPFC only controlling single line power flow

3.2.4 UPFC 潮流计算特殊问题

1) 控制目标功率校验

在软件实现时, 调度员潮流计算软件从状态估计获取初始基态断面, 控制目标值 P_c 、 Q_c 默认设置为基态断面值, 使用人员修改控制目标时, 一般设置有功目标值, 无功目标值默认按照功率因数 0.95 设置, 也可以人工指定无功目标值。在潮流计算功能中, 受到 UPFC 串联装置容量的限制, 线路有功功率调节的范围有一定的限制。设串联侧等效注入电势最大值为 V_{B_max} , 串联变压器网侧额定电流设为线路最大热稳定电流限值, UPFC 未动作时电网自然分布下的线路末端有功为 P_0 , 交流母线电压为 V_0 。在 UPFC 注入电压为最大串联电势 V_{B_max} 时, 流经线路的潮流最小, 设此时电流为 I_{min} , 假设 UPFC 动作前后母线电压 V_0 变化不大, 此时近似有 $P_0 - \sqrt{3}V_{B_max}I_{min} \approx \sqrt{3}V_0I_{min} \cos \varphi$, 则

$$I_{min} = \frac{P_0}{\sqrt{3}(V_{B_max} + V_0 \cos \varphi)} \quad (5)$$

式中, $\cos \varphi$ 为线路潮流功率因素。

根据 I_{min} 计算 UPFC 动作后线路最小功率值 P_{min} 。在考虑 UPFC 动作的潮流计算前, 根据此方法可实现潮流控制目标的合理性校验, 当控制目标 P_c 小于 P_{min} 时提示调度使用人员需要重新设置控制

目标。对于无功功率 Q_c 基于 P_{\min} 按功率因素 0.95 进行校验。

另外,也可采用另一种方式进行校验。设线路控制目标 P_c 和 Q_c , 根据上文所述方法考虑 UPFC 进行潮流计算,在潮流计算收敛后,计算 UPFC 控制参数 V_B , 然后对 V_B 进行校验。当 V_B 大于 $V_{B_{\max}}$ 时,给出告警提示使用人员 UPFC 串联侧调节容量越限,需要重新设定控制线路潮流目标值。

2) 并联侧控制模式自动转换

同样地,对于并联侧采用定无功功率/定电压调节,其可实现的调节范围也是有限的。当并联侧采用无功功率控制模式时,设置的无功值需要小于并联变压器容量;当并联侧采用电压控制模式时,在潮流收敛后,计算并联变压器无功功率值,当其大于并联变压器额定容量时,该节点需要转换为 PQ 节点重新进行潮流计算。采用文献[24]中介绍的 PV 转 PQ 节点的处理方式即可。

3.3 计及 UPFC 的静态安全分析软件

目前调度控制系统静态安全分析软件提供了对线路、变压器、发电机、母线和自定义多重设备故障集的开断分析。UPFC 是电网中比较重要的元件,一方面由于 UPFC 具有调节线路潮流和母线电压的能力,在监视到其所连接线路潮流越限时,UPFC 可以自动调节线路潮流,以降低线路负载;另一方面,UPFC 因故障退出后不再具备调节线路潮流或者调节母线电压能力。所以在静态安全分析软件中需要对 UPFC 设备进行 $N-1$ 开断分析计算。

在本文所述的静态安全分析软件中考虑了 UPFC 变压器故障以及换流器故障的模拟计算。同时由于 UPFC 具有调节线路潮流的功能,在 $N-1$ 开断计算中计及了 UPFC 对潮流的自动控制作用。

3.3.1 UPFC 变压器故障模拟计算

当模拟 UPFC 串联变压器 $N-1$ 故障时,由于 UPFC 一般装设在双回线上,当其中一台串联变压器故障时,根据 3.2.3 节中所述,此时不能设置故障变压器对应的线路直接接入电网,并且另一条线路由 UPFC 控制潮流。一般采用如下两种处理方式。方式一:退出故障变压器所连接的线路,另一回线路的 UPFC 运行在 SSSC 方式,并联侧可运行在 STATCOM 方式。该种方式下 UPFC 具有一定的线路潮流调控能力,但该种方式需要退运一条线路,改变了电网结构,并且只能调控单回线路潮流。方式二:停运双线串联变压器,变为双线无 UPFC 运行,并联侧可运行在 STATCOM 方式。该种方式下虽然电网网络拓扑没有发生大的改变,但不具备线路潮流调控的能力。在模拟 UPFC 串联变压器故障

$N-1$ 时,具体采用何种运行方式,使用者可结合电网的实际运行情况进行选择,在软件实现时通过配置控制策略供使用者选择最有利的处理方式。

当模拟 UPFC 并联变压器 $N-1$ 故障时,退出 UPFC 并联部分,不再具有控制母线电压作用,此时 UPFC 运行在 SSSC 方式。

3.3.2 UPFC 换流器故障模拟计算

由于双回线装设 UPFC 时,一般配置 3 个换流器,其中每回线路配置一个换流器,并联侧共用一个换流器。当模拟换流器 $N-1$ 故障时,需要考虑 3 个换流器功能可以相互切换。

在模拟并联侧换流器 $N-1$ 故障退出时,在稳态分析时不考虑 SSSC 充电过程,设置串联侧运行在 SSSC 方式。当模拟串联侧换流器 $N-1$ 故障退出时,由于可以通过转换开关的操作将故障换流器退出运行,将并联换流器转到串联侧运行,设置换流器运行在 SSSC 方式。

3.3.3 UPFC 线路潮流越限控制策略

在静态安全分析功能计算中,模拟非 UPFC 设备及其控制线路的 $N-1$ 计算时,若 UPFC 控制线路潮流越限,此时需要考虑 UPFC 对线路潮流的自动控制作用,通过调节 UPFC 有功潮流目标值,将线路的负载控制在热稳定限额以下。为了实现的简便,在静态安全分析计算软件中,将 UPFC 的控制调节作用套用“自动装置设置”工具,按照定义的动作逻辑进行设置,UPFC 线路潮流越限控制策略如表 4 所示。

表 4 UPFC 线路潮流越限控制策略
Table 4 Power flow control strategy for UPFC transmission lines

监视设备	UPFC 双回线路运行	UPFC 单回线路运行
启动条件定义 (潮流条件)	双回线路中一条线路潮流越限	单回线路潮流越限
动作策略	设置各回交流线路有功目标值为 P_{set} , 启动 UPFC 控制潮流作用	设置单回交流线路目标值 P_{set} , 启动 UPFC 控制潮流作用

注: P_{set} 按最大功率设置,无功功率 Q_c 根据 P_{set} 按功率因素 0.95 设置。

3.3.4 UPFC 电压越限控制策略

当模拟非 UPFC 并联侧设备 $N-1$ 计算时,若出现 UPFC 并联侧所连交流母线电压越限,启动 UPFC 对母线电压的自动控制作用。类似于 UPFC 线路潮流越限控制策略实现方式,套用“自动装置设置”工具按照定义的动作逻辑进行设置,当 UPFC 并联侧交流母线电压越限时,根据预先设置的交流母线电压目标值 V_{set} , 进行 $N-1$ 方式下的潮流计算。如

表 5 所示。

表 5 UPFC 电压自动控制策略

Table 5 Automatic voltage control strategy of UPFC

监视设备	UPFC 并联换流器所连交流母线
启动条件定义 (潮流条件)	① 交流母线电压小于电压下限或 ② 交流母线电压大于电压上限
动作策略	设置交流母线电压目标值 V_{set}

4 UPFC 模型图形建立及共享

4.1 UPFC 模型建立及共享

目前,在调度控制系统遵循模型源端分责维护、全网按需共享的运维原则,各级调控机构负责维护其调度管辖范围内的电网模型。上下级调控中心之间及调控中心内部依据电力行业标准《电网运行模型数据交换规范》采用模型拼接的方式实现模型

共享^[25-27]。

对于 UPFC 模型的建立,运维人员根据本文第 2 节中描述的 UPFC 稳态物理模型和量测采集模型在调控系统关系表中对本级调度管辖的 UPFC 进行源端建模。UPFC 在源端维护后除了供本级调控系统使用外,还需共享至上级/下级调控系统使用。目前《电网运行模型数据交换规范》中没有对 UPFC 模型进行规范,依据本文建立的 UPFC 物理模型扩展 CIM/E 以实现 UPFC 模型在调控中心间及其内部系统间的模型共享,模型共享示意图和共享的设备如图 6 所示,在传统模型的基础上扩展共享 UPFC 系统、串联变压器、串联变压器绕组等模型。这样不影响已有电网模型的交互又能实现对 UPFC 模型的交互共享。

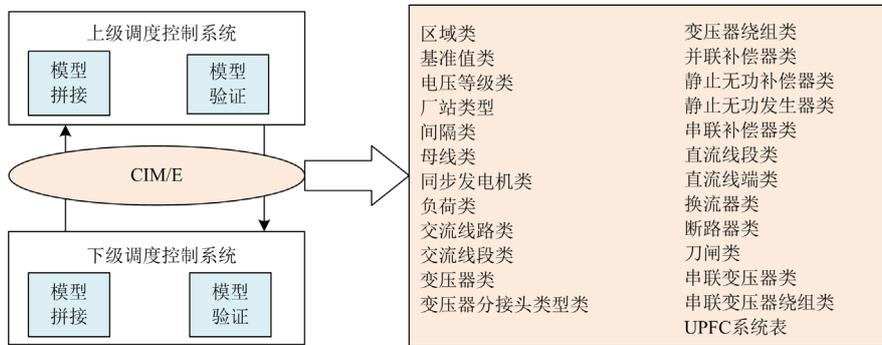


图 6 含有 UPFC 的电网模型建立与共享流程

Fig. 6 Power grid model establishment and sharing architecture with UPFC

在调控系统中基于采集点表模型解析量测原始报文以获取设备的实时量测数据^[28],当在不同调控系统间共享 UPFC 模型时,需要同步共享 UPFC 采集点表模型。共享采集点表模型使用与共享物理模型相同的方式实现各调控系统 UPFC 设备采集模型的一致性,可以减轻调度自动化运维人员维护点表的工作量,并能够有效提高 UPFC 采集信息的正确性和一致性。

4.2 UPFC 厂站接线图建立及共享

调控系统采用 CIM/G 标准进行电网图形的维护与共享,实现在调控中心内部及之间电网图形的全景存储和在线实时浏览等功能^[29]。根据本文 2.1 节中描述的 UPFC 设备模型遵循 CIM/G 定义的规则,直接把串联变压器类名(seriestransformer)映射为电力图形元素名,根据元素名称在图元库文件中定义串联变压器图元。

在绘制含有 UPFC 的厂站接线图时,串联变压器图元关联 CIM/E 中的串联变压器对象实现 UPFC 厂站接线图的绘制及相关属性的维护,UPFC 厂站

接线图绘制完成后进行节点入库形成 UPFC 一次设备的节点号。遵循 CIM/G 标准进行 UPFC 厂站接线图的导出导入实现厂站接线图在调控系统内部及不同调控系统之间共享。

5 结论

本文从调控系统的实际建设情况出发,提出了 UPFC 稳态模型在调控系统中的建模方法,在 D5000 的实际应用中,证明了所述方法具有较好的有效性和实用性。

1) 基于现有调控系统电网物理设备模型的建立方式,设计了 UPFC 稳态物理模型和量测采集模型的实现方案及其关系型模型的域属性。

2) 将基于节点附加注入功率的 UPFC 数学模型应用于调控系统中在线运行的状态估计、调度员潮流、静态安全分析等高级应用软件,提出了计及 UPFC 的电力系统高级应用软件实现方法。

3) 在牛顿法潮流的基础上,引入考虑 UPFC 的控制目标,将 UPFC 对电网潮流的影响转移到潮流

修正方程中,详细说明了潮流雅可比矩阵的修正方式及稀疏存储实现方式,只需要修正少量元素,便于嵌入已有的调度员潮流程序。

4) 阐述了调度员潮流计算功能中 UPFC 功率和电压控制功能的实现方式,提出了 UPFC 潮流计算中控制目标功率校验和并联侧控制模式自动转换两个特殊问题的处理方式。

5) 提出了考虑 UPFC 设备 $N-1$ 故障,以及在 $N-1$ 开断计算中考虑 UPFC 的潮流电压越限控制策略的实现方案,提高了静态安全分析软件计算结果的准确性。

6) 基于 CIM/E、CIM/G 标准设计了在上下级调控中心之间及调控中心内部建立和共享 UPFC 物理模型、采集模型以及图形的具体实现方案。

参考文献

- [1] 杨林, 蔡晖, 汪惟源, 等. 500 kV 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(2): 47-53.
YANG Lin, CAI Hui, WANG Weiyuan, et al. Application of 500 kV UPFC in Suzhou southern power grid[J]. Electric Power, 2018, 51(2): 47-53.
- [2] 凌峰, 李九虎, 田杰, 等. 适用于双回线路的统一潮流控制器系统结构优化分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 113-119, 143.
LING Feng, LI Jiuhu, TIAN Jie, et al. Optimization analysis of UPFC system structure for double-circuit lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 113-119, 143.
- [3] 高本锋, 王晓, 梁纪峰, 等. 混合型统一潮流控制器抑制风电次同步振荡控制策略[J]. 电力建设, 2021, 42(9): 53-64.
GAO Benfeng, WANG Xiao, LIANG Jifeng, et al. Control strategy of hybrid unified power flow controller to suppress wind power sub-synchronous oscillation[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(9): 53-64.
- [4] 赵长枢, 邱晓燕, 赵有林, 等. 泛在电力物联网框架下的新型 UPFC 系统[J]. 电力建设, 2020, 41(1): 39-44.
ZHAO Changshu, QIU Xiaoyan, ZHAO Youlin, et al. A new UPFC system in the framework of ubiquitous power internet of things[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(1): 39-44.
- [5] 吴熙, 王亮, 陈曦, 等. UPFC 与 IPFC 提升系统输电能力比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 128-134.
WU Xi, WANG Liang, CHEN Xi, et al. Comparative research on UPFC and IPFC enhancing transmission capability of a power system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 128-134.
- [6] 刘俊磊, 乔小敏, 杨韵, 等. 基于 UPFC & DC-SDC 的交直流电网低频振荡抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 73-79.
LIU Junlei, QIAO Xiaomin, YANG Yun, et al. Study on damping low frequency oscillation of an AC/DC power grid based on UPFC & DC-SDC[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 73-79.
- [7] MISHRAI S K, TRIPATHY L N. A critical fault detection analysis & fault time in a UPFC transmission line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 24-33.
- [8] 国网江苏省电力公司. 统一潮流控制器工程实践: 南京西环网统一潮流控制器示范工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [9] HAN Z X. Phase shifter and power flow control[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1982, 101(10): 3790-3795.
- [10] FANG W L, NGAM H W. Control setting of unified power flow controllers through a robust load flow calculation[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1999, 146(4): 365-369.
- [11] SUN Hongbo, YU D C, LUO Chunlei. A novel method of power flow analysis with unified power flow controller (UPFC)[C] // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, January 23-27, 2000, Singapore, Singapore: 2800-2805.
- [12] 孙国强, 卫志农, 李阳林, 等. 计及统一潮流控制器的电力系统状态估计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 63-67.
SUN Guoqiang, WEI Zhinong, LI Yanglin, et al. Power system state estimation with UPFC considered[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 63-67.
- [13] 邹振宇, 江全元, 张鹏翔, 等. 基于新型电力系统仿真工具的 UPFC 建模研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(6): 1002-1006.
ZOU Zhenyu, JIANG Quanyuan, ZHANG Pengxiang, et al. Modeling research of UPFC with novel power system toolbox[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(6): 1002-1006.
- [14] 胡源, 张福生, 徐小林, 等. 基于 PSAT 的 UPFC 电力系统潮流建模与仿真[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2017, 30(4): 73-77.
HU Yuan, ZHANG Fusheng, XU Xiaolin, et al. Power flow modeling and simulation of UPFC in power system based on PSAT[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2017, 30(4): 73-77.
- [15] KERI A J F, MEHRABAN A S, LOMBARD X, et al.

- Unified power flow controller (UPFC): modeling and analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2): 648-654.
- [16] 姚蜀军, 宋晓燕, 汪燕. 基于 PSASP 的统一潮流控制器潮流建模与仿真[J]. 华北电力大学学报, 2011, 38(5): 11-16.
YAO Shujun, SONG Xiaoyan, WANG Yan. Power flow modeling of unified power flow controller based on power system analysis software package (PSASP)[J]. Journal of North China Electric Power University, 2011, 38(5): 11-16.
- [17] 刘畅, 吴军, 郝露茜, 等. 基于直流潮流的 UPFC 优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 42-48.
LIU Chang, WU Jun, HAO Luxi, et al. Optimization configuration research of UPFC based on DC power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 42-48.
- [18] 刘前进, 黎雄, 孙元章. 基于 PSASP 程序的 FACTS 潮流建模[J]. 电网技术, 2000, 24(7): 6-9.
LIU Qianjin, LI Xiong, SUN Yuanzhang. Power flow modeling of FACTS based on PSASP[J]. Power System Technology, 2000, 24(7): 6-9.
- [19] 罗玉春, 王毅, 戴则梅, 等. 基于多调度控制中心的分解协调状态估计[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1516-1521.
LUO Yuchun, WANG Yi, DAI Zemei, et al. Decomposition and coordination state estimation for multi dispatching and control centers[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1516-1521.
- [20] SINGH N, GLAVITSCH H. Detection and identification of topological errors in online power system analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(1): 324-331.
- [21] SINGH N, OESCH G F. Practical experience with rule-based on-line topology error detection[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2): 841-847.
- [22] 国家电网公司. 智能电网调度控制系统实用化验收办法[S]. 2013.
- [23] 罗玉春, 王毅, 闪鑫, 等. 超大规模电网快速状态估计的实现方法[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 132-140.
LUO Yuchun, WANG Yi, SHAN Xin, et al. Implementation method of fast state estimation for ultra-large scale power grid[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 132-140.
- [24] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [25] 国家能源局. 电网运行模型数据交换规范: DL/T 1380—2014[S]. 2014.
- National Energy Administration. Specification for exchanging of grid operating model data: DL/T 1380—2014[S]. 2014.
- [26] 刘崇茹, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于 CIMXML 电网模型的互操作研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 45-48.
LIU Chongru, SUN Hongbin, ZHANG Boming, et al. An investigation on a common information model for energy management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(14): 45-48.
- [27] 潘毅, 周京阳, 吴杏平, 等. 基于电力系统公共信息模型的互操作试验[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 25-28.
PAN Yi, ZHOU Jingyang, WU Xingping, et al. Interoperability test based on common information model[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 25-28.
- [28] 彭晖, 吴涛, 史浩秋, 等. 新一代电网调控系统分析决策中心多活数据同步设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 98-104.
PENG Hui, WU Tao, SHI Haoqiu, et al. Design and implementation of multi-active data synchronization in analysis and decision-making center of new generation power grid dispatching and control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16): 98-104.
- [29] 李伟, 辛耀中, 沈国辉, 等. 基于 CIM/G 的电网图形维护与共享方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 42-47.
LI Wei, XIN Yaozhong, SHEN Guohui, et al. Scheme of power grid graphics maintenance and sharing based on CIM/G[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 42-47.

收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-05-31

作者简介:

罗玉春(1984—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 从事电网调度自动化系统电网分析及计算研究; E-mail: luoyuchun@sgepri.sgcc.com.cn

王毅(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力调度自动化电网分析与控制研究; E-mail: wang-yi2@sgepri.sgcc.com.cn

闪鑫(1980—), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 从事电网调度自动化高级应用研究。

(编辑 葛艳娜)