

输变电技术

输配网一体化建模与分析方法研究综述

余佳音¹, 唐坤杰², 章杜锡¹, 周 飞¹, 董树锋², 吴金城²

(1. 国网浙江省电力有限公司宁波供电公司, 浙江 宁波 315010;

2. 浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 随着国家电网公司“大运行”体系建设的深入, 省地县一体化态势逐渐形成。省地县一体化的实质就是实现输电网和配电网的一体化管理和调度。针对近年来国内外输配网一体化建模与分析的新方案和新进展, 对输配网一体化建模与分析的必要性、输配网一体化建模与分析面临的困难、输配网一体化建模方法、输配网一体化分析方法等四个方面进行综述, 并重点就建模方法中的主从分裂模型和区域等值模型以及分析方法中的潮流计算、运行风险评估、优化调度、稳定性分析、高性能计算的应用进行评述, 最后结合未来省地县一体化的发展趋势对输配网一体化建模与分析方法的发展进行展望。

关键词: 输配网一体化; 省地县一体化; 主从分裂模型; 建模与分析; 高性能计算

文章编号: 1007-1881(2019)11-0001-09

DOI: 10.19585/j.zjdl.201911001

中图分类号: TM73

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Overview of Modeling and Analysis Methods for Integrated Transmission and Distribution Network

YU Jiayin¹, TANG Kunjie², ZHANG Duxi¹, ZHOU Fei¹, DONG Shufeng², WU Jincheng²

(1. State Grid Ningbo Power Supply Company, Ningbo Zhejiang 315010, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: With the construction of "large operation" system proposed by State Grid Corporation of China, province-prefecture-county integration trend has gradually formed, the essence of which is the integrated management and dispatch of transmission and distribution networks. According to the new scheme and new progress of modeling and analysis for integrated transmission and distribution network both at home and abroad in recent years, four aspects including necessities of integrated modeling and analysis, difficulties of integrated modeling and analysis, integrated modeling methods and integrated analysis methods are reviewed, especially the modelling methods of master-slave-splitting model and regional equivalent model and analysis methods of power flow calculation, operational risk assessment, optimization scheduling, stability analysis and application of high-performance computation are summarized. Finally, based on the future trend of development of province-prefecture-county integration, the advancement of modelling and analysis methods for integrated transmission and distribution network is forecasted.

Keywords: integrated transmission and distribution; province-prefecture-county integration; master-slave-splitting model; modelling and analysis; high-performance computation

0 引言

长期以来, 我国电网采取分层分区的管理体

制, 各级调度机构对其管辖范围以内的电网进行详细建模, 而对于管辖范围以外的电网则进行简化建模, 例如网省级调度将配电网等值为功率已知的负荷, 地县级调度则将输电网等值为电压已知的电源。

这种分散式管理模式使得各级调度系统相互

基金项目: 国网浙江省电力有限公司宁波供电公司群众性创新研究(NB020XT06)

独立,存在重复建设现象,系统建设和维护成本高。同时,分散式的管理产生信息孤岛现象,各级系统相互之间只能交换有限信息,致使整个电网无法实现统一调度、管理和监控^[1]。各级调度系统建模和计算的独立性致使相关高级应用的计算缺乏同步性,计算精度相对较低。

在此背景下,省地县一体化的概念应运而生。省地县一体化,其实质就是实现输电网和配电网的一体化管理和调度,近年来受到产业界和科研界的广泛关注,一体化调控管理系统的研制和开发持续推进^[2-4]。表 1 给出了输配网一体化研究内容分类,可以看出,一些学者对输配网一体化下调控管理系统的体系建设进行框架设计和完善^[1, 5-13];也有一些学者在输配网一体化背景下对电网进行重新建模,为潮流计算、运行风险评估、优化调度、稳定性分析等相关高级应用提出适应一体化环境的分析方法^[14-56]。此外,还有部分学者对于输配网一体化背景下的实时控制、规划问题等进行了研究^[57-61]。

表 1 输配网一体化研究内容分类

研究方向	内容	相关文献
输配网一体化调控管理系统的框架设计	系统框架设计	[1], [5-13]
	主从分裂模型	[14-18], [20-53]
输配网一体化建模	区域等值模型	[19], [54-56]
	全局一体化模型	[10], [12]
输配网一体化分析	潮流计算	[14-15], [17-22], [25-36], [54-55]
	运行风险评估	[16], [37]
	优化调度	[28], [38-45], [56]
	稳定性分析	[19-20], [23-24], [46-52]
	拓扑分析	[12]
	状态估计	[53]
输配网一体化实时控制	输配网一体化实时控制策略	[57-59]
输配网一体化规划	输配网一体化下的储能规划	[60]
	输配网一体化的综合规划	[61]

然而,为了适应新形势与新环境,进一步保障未来省地县一体化下输配网的安全、可靠、经济运行,一些新的输配网一体化问题还有待进一步探讨和研究。

本文聚焦于输配网一体化建模与分析的相关研究,结合近年来国内外输配网一体化建模与分析的新方案和新进展,对输配网一体化建模与分析的必要性、输配网一体化建模与分析面临的困难、输配网一体化建模方法、输配网一体化分析方法等四个方面进行综述,并结合未来省地县一体化的发展趋势对输配网一体化建模与分析方法的发展方向进行展望。

1 输配网一体化建模与分析的必要性

随着电网规模的不断扩大及运行方式的日趋复杂,传统输配网独立进行管理调度、建模分析的方式已逐渐不能适应未来电网调度运行业务发展的需求,输配网一体化分析的必要性日益凸显。

1.1 精确处理输配电网间日益增长的耦合关系

近年来,配电网中光伏、风机、储能等分布式电源迅速发展,配电网的主动性增强。配电网中的一些分布式电源不但能够提供有功功率,也能提供无功功率,同时具备调节有功和无功的能力,这使得输配电网的有功功率和无功功率相互渗透,均可实现双向流动,大大增强了输电网与配电网间的耦合关系^[14]。

随着配电网的不断发展以及输配电网间耦合关系的增强,配电网对于输电网节点电压的影响不可忽略,传统分析计算中输电网三相对称、配电网波动不影响输电网等假设不一定成立^[15]。因此,传统的独立模型分析方法将产生不精确的计算结果。

为了能够恰当处理输配网间日益增长的耦合关系,综合输配网模型进行一体化、精细化的建模与分析是必要的。

1.2 进一步提高电网运行的安全性和稳定性

传统输电网的安全校核一般将配电网视作输电网节点的注入负荷进行处理。这种安全校核方式计算速度快,在大多数情形下基本能够满足电网安全稳定性的判断。

但是,随着配电网的不断发展,环网运行方式增多,传统输电网安全校核的有效性受到削弱。因此,输配网一体化建模和分析将结合电网运行中的新问题和新情况,完善传统的安全校核方法,进一步提高电网运行的安全性和稳定性。

1.3 满足输配网一体化管理和调度的需求

近年来, 输配网一体化下调控管理的体系建设和系统研发一直得到广泛关注, 而输配网一体化建模与分析方法正是输配网一体化管理和调度的基础和保障, 支撑各项高级应用。

具体而言, 输配网一体化管理和调度模式下, 其高级应用应涵盖实时运行风险评估、故障处置等功能^[12]。而其中, 实时运行风险评估需要输配网一体化的拓扑分析、状态估计、潮流计算、安全校验等手段进行支撑, 以把握全网的实时运行状态; 故障处置则需要输配网一体化的拓扑分析、重构与负荷转供、潮流计算、安全校验等手段进行支撑, 以及及时把握故障范围, 并在故障恢复阶段尽快形成安全合理、优化程度高的供电恢复策略以供实施。

2 输配网一体化建模与分析面临的困难

输配网一体化建模与分析不意味着输电网建模分析和配电网建模分析的简单叠加, 在建模方法、精度、速度等方面面临着诸多困难, 需要采取针对性的方法进行应对^[14-15, 17]。

2.1 输配网建模和分析方法差异巨大

输电网、配电网在网络结构方面存在巨大差异。输电网一般是三相对称环网状电网, 包含大量发电机节点; 配电网则一般呈现辐射状, 三相不对称, 在某些特殊运行方式下可能出现短时的弱环网运行, 以负荷节点为主, 新能源技术的发展也使得配电网中出现分布式电源。

2 种网络结构使得输电网、配电网的建模和分析方法存在巨大差异。网络结构和建模方式的差异使得输配网中的分析方法往往有所不同。输配网一体化计算时, 如何将不同的建模方式和分析方法进行有机结合和统一是一个重要课题。

2.2 输配网数据性质存在显著差异

输电网、配电网的数据性质往往存在显著差异。例如, 配电网中的电阻-电抗比显著大于输电网, 输配网具体的网络参数数值、支路功率等也有数量级差异, 这使得输配网一体化分析计算过程中的有关矩阵(如潮流计算过程中的雅可比矩阵、最优潮流求解过程中的海森矩阵等)条件数差, 病态程度严重, 计算过程中存在数值稳定性的问题。因此, 如何有效应对数据性质差异带来

的数值稳定性问题是输配网一体化分析方法的一个重要研究方向。

2.3 输配网一体化系统规模庞大

输配网一体化使得整个系统的节点和支路数目大大增加, 计算规模将非常庞大, 常规的硬件设备和传统的串行计算方法难以在计算效率方面提供有效支持。因此, 通过并行、分布式技术大幅提高计算效率是输配网一体化相关算法实时性的重要保障。

3 输配网一体化建模方法

输配网一体化建模重点在于如何解决输配网间的耦合关系, 即真实反映配电网对输电网的扰动作用。对输配网一体化这种大规模的数学问题进行求解, 主流的思路是将一个大规模的问题分解成多个较小规模的问题来求解。

主从分裂模型和区域等值模型是 2 种常见的输配网一体化模型, 其思路均是对输配网进行分区建模。另一方面, 近年来随着省地县一体化调控态势的加深, 很多输配网模型拼接或模型共享的方案被提出^[10-12], 这使得建立全局的、统一的输配网模型成为可能。

3.1 主从分裂模型

主从分裂模型是目前最为常见的用于一体化输配网的模型, 文献中输配网一体化的相关计算也主要基于这一模型^[14-18, 20-53]。

3.1.1 建模思路

在主从分裂模型中, 输电网作为主系统, 配电网作为从系统, 主系统和从系统之间没有直接相连的支路, 而只是间接地通过边界节点发生联系, 如图 1 所示。

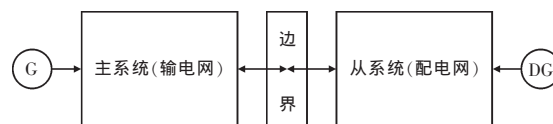


图 1 输配网一体化的主从分裂模型

虽然目前的研究成果大多基于这一模型, 但对于输电网、配电网和边界的具体建模方式是有差异的。

(1) 输电网建模

输电网一般可以视作三相对称的, 但在输配

网一体化条件下,若要详细刻画输电网的状态,则三相不是严格对称的。在稳态计算时,配电网对输电网对称性的影响有限,因此输电网可以根据具体情况选择建立三相^[15, 20-21]或单相模型^[22]。但在暂态仿真等计算中,输电网一般建立成三相模型将更加准确^[20-22]。

(2) 配电网建模

传统的配电网通常被视作辐射性网络,有些元件参数三相不对称,也有些负荷三相不平衡,使得整个配电网一般呈现三相不对称。因此,配电网通常使用相分量法建立三相模型^[15, 20-24]。

(3) 边界建模

文献[17-18]中,各边界节点流向配电网的潮流的复功率矢量被作为中间变量,以反映配电网对输电网的扰动作用,在输配网交替迭代计算的过程中最终使得中间变量收敛。文献[22]将输配电网接口建立为一个 π 型无源网络,以等值一条线路或一台变压器。文献[27]基于输配电网之间的电气连接关系及其各自网络结构特点,建立输配电网边界映射区以处理失配功率,并相应给出交替迭代计算中的收敛判据。

3.1.2 模型主要优势及特点

主从分裂模型针对输配网一体化分析面临的主要困难进行设计,其主要优势包括^[17]:

(1) 支持输配网差异化的建模与分析计算,即输电网和配电网可以分别使用适应各自网络特点的建模和分析计算方法,灵活性好,同时可以根据实际计算需要设定不同的标幺基值和收敛精度。

(2) 通过分治思想将一体化输配网划分为输电网和各配网区域,分析计算规模减小。同时,各配网区域的计算具有自然可并行性,可以结合并行计算或分布式计算技术进行加速,因此基于主从分裂模型的分析计算效率较高。

3.1.3 模型的局限性

主从分裂模型及基于这一模型的相关分析算法的局限性主要体现在:

(1) 主从分裂法虽然能够实现输配网一体化分析,但其本质上仍是一种分层的、近似的模型,这可能使得主从分裂模型交替迭代的收敛值和真实值存在一定偏差。

(2) 主从分裂模型及交替迭代算法的核心在于边界节点的物理量交互,但这也是这一模型和

算法的潜在弱点。随着同一配电根节点下馈线数目的增加,主从分裂法的收敛性将变差^[18]。

3.2 区域等值模型

区域等值模型是将需要重点研究的区域以外的网络进行等值,使得等值后的网络在外部扰动下的响应与原复杂网络在相同扰动下的响应基本一致^[19]。

传统的区域等值模型即网省级调度将配电网等值为功率已知的负荷,地县级调度则将输电网等值为电压已知的电源,这种方法在实际生产实践中使用得比较普遍,但其精度还有很大的提升空间。一些文献对区域等值模型进行了进一步的研究,用以解决输配网一体化问题^[19, 54-56]。

文献[19]将基于广域量测的戴维南等值参数辨识方法用于建立输配网的耦合单端口等值模型。耦合单端口等值模型的关键在于能否准确预估输配电网的交互功率,以充分反映输电网和配电网之间的耦合,从而保证后续计算的精度。

文献[54-55]假设输电网三相平衡,而配电网三相不平衡,分别对输电网、配电网和两者边界进行等值处理,用于分析一体化输配网中特定区域。

区域等值模型相比于主从分裂模型可以省去交替迭代计算的过程,但是仅适用于研究输配网一体化模型中的输电网或配电网的某一特定区域,其本质上也是一种分层的、近似的模型。

3.3 全局统一模型

全局统一模型是指将输配电网模型不设假设条件、不作近似地完全进行拼合,即将输电网和配电网中的每一个节点和每一条支路都视作相同地位进行处理,是一种全局的、统一的模型,能够精确刻画输配网的耦合关系,而不仅仅是通过边界节点的物理量变化进行反映。

但是由于过去在长期的分级管理模式,输配网模型难以共享,全局统一模型难以在生产中实际应用,基于这一模型的分析方法的研究成果也比较有限。

随着“大运行”体系的实施和推进,全局统一模型的建立成为可能,但是在使用这一模型时也将面临诸多困难和挑战,包括输配网数据数量级差异导致的矩阵严重病态、算法收敛性差、计算规模过于庞大等等。

4 输配网一体化分析方法

类比于传统输电网调度和管理的相关高级应用, 输配网一体化分析主要包括输配网一体化的拓扑分析、状态估计、潮流计算、运行风险评估、优化调度、稳定性分析等等。目前, 主要的研究成果集中在潮流计算、运行风险评估、优化调度、稳定性分析, 以及高性能计算在上述输配网一体化分析过程中的应用。

4.1 输配网一体化潮流计算

输配网一体化潮流重点在于考虑两者的耦合性。由于需要求解全局的潮流分布, 相关文献的计算方法一般均以主从分裂为基础模型。

文献[14-15, 17-18, 20-22, 25-36]采用交替迭代算法, 即输电网、配电网分别采用适宜的算法、基准值和收敛精度要求交替进行潮流计算, 使得预设的中间变量(如边界节点的注入功率、边界节点的电压等)最终收敛。

上述方法有效联立了输配网并能够求解全局的潮流分布, 其交替迭代的计算方法也能够保证较好的收敛性能, 对于环网、分布式电源等情形也具有较好的适应性。但是, 由于上述潮流计算方法基于主从分裂模型, 故存在潜在的精度问题, 例如当接入的配电网负荷较重, 基于主从分裂模型计算配电网部分潮流时所隐含的假设条件——“配电网的根节点电压恒定”不再成立, 此时交替迭代计算输配网全局的潮流分布可能存在较大误差。

4.2 输配网一体化运行风险评估

输配网一体化运行风险评估包含考虑配电网影响的输电网运行风险评估、考虑输电网影响的配电网运行风险评估、全网运行风险评估等三方面内容。

对于考虑配电网影响的输电网运行风险评估, 文献[16]基于主从分裂的全局潮流计算模型提出了输电网安全校验算法。由于系统全校验计算量大, 计算效率低, 该文献给出 3 种加速方法, 包括筛选输电网故障集、使用直流输电网模型、使用配电网等效模型等。作为第一种加速方法的延伸, 文献[37]指出, 输配网一体化模型下, 输电网故障集筛选时不能完全按照传统的方法, 而要考虑配电网的影响, 文中给出 2 种算法提高故障

集筛选的准确性。

而对于考虑输电网影响的配电网运行风险评估、全网运行风险评估, 以及运行风险评估中除了安全校验以外的内容如自备投闭锁风险评估、薄弱运行方式的辨识等, 相关研究成果还比较有限。

4.3 输配网一体化优化调度

输配网一体化优化调度的研究目前主要集中于经济调度的建模与计算。

文献[38-40]建立了输配网一体化的经济调度模型, 采用异构分解算法进行求解。文献[41]建立了输配网一体化的动态经济调度模型, 并使用分布式多参数二次规划进行模型的求解。文献[42]和文献[56]分别基于电网模型等值、母线负荷预测改进, 提出输配网一体化的发电计划优化方法。

关于引入了电压约束和其他运行约束的经济调度, 即最优潮流方面, 文献[43]基于主从分裂模型建立了输配网一体化的交流最优潮流模型, 并提出异构分解算法用以求解优化模型。文献[44]基于节点边际电价提出一种两阶段直流最优潮流算法。文献[28]采用辅助问题原理, 通过构造核函数, 将一体化优化模型转换为迭代优化模型。

此外, 文献[45]在传统经济调度和安全约束调度的基础上, 提出一种基于目标级联分析的分散协调风险调度方法, 输配网调度系统分别构建优化问题并通过迭代求解。

上述各类求解输配网一体化优化模型的算法虽然基于的具体模型不同, 但在求解过程中都将输电网和配电网分开建立优化模型, 并进行交替迭代的优化计算, 每次交替时将上一步的部分优化结果作为下一步计算中的约束。这些交替迭代的算法在实施过程中往往容易陷入局部最优的困境。

4.4 输配网一体化稳定性分析

输电网和配电网的协同暂态仿真是输配网一体化稳定性分析的基础, 暂态仿真包括机电暂态仿真和电磁暂态仿真。现有的成熟软件中, 机电暂态仿真一般不支持三相模型仿真, 使得一体化输电网的仿真将产生较大误差。电磁暂态仿真虽能够通过三相模型的仿真支持输配一体化电网的暂态分析, 但对系统规模有所限制, 计算效率也比较低。针对输配网一体化协同暂态仿真, 一些

学者通过不同的方式取得了初步成果^[20, 23-24, 46-50]。例如,文献[46-47]基于主从分裂模型对输配网的仿真进行解耦,各自采用现有不同的成熟软件进行仿真,通过交替迭代的方法得到最终结果。文献[48-50]利用矩阵运算中的舍尔补方法提出分区仿真算法,以提高计算效率。

除暂态仿真外,文献[51]分析了输配网一体化模型下,大量光伏的投入对电力系统小干扰稳定性的影响。文献[19]定义了负荷阻抗模裕度指标,基于输电网戴维南等值模型提出了输配协同的配电网电压稳定安全态势评估方法。

5 探讨与展望

自 20 世纪末以来,输配网一体化建模和分析方法在国内外已经有了一定程度的技术积累。但随着省地县一体化态势的加深,以及输配网格局的不断变化,现有的输配网一体化建模和分析方法还有较大的发展空间,输配网一体化格局所带来一些新的科学问题还有待进一步研究和探索。

5.1 高维病态稀疏矩阵预处理和线性方程组求解方法

输配网一体化下,各类分析计算往往面临着大量高维稀疏线性方程组的求解。同时,由于输配网性质的巨大差异,方程组对应的系数矩阵常常是严重病态的。因此,输配网一体化下的方程组求解往往面临数值稳定性差、计算效率低的问题。

针对上述问题,可以考虑利用数值计算相关理论,结合电力系统计算中产生的矩阵特点,对系数矩阵进行必要的预处理,以改善矩阵条件数。同时,求解大规模线性方程组时,传统的基于 LU 分解或 QR 分解的直接法效率低下,因此可以考虑将迭代法理论应用到方程组的求解中。

5.2 保证全局最优性的高效输配网一体化优化调度模型及求解方法

目前,输配网一体化优化调度模型主要采用分区、分阶段、交替迭代的方法求解,这一求解方法往往面临着局部最优的问题,且计算效率相对较低,收敛性难以保证。

针对上述问题,可考虑建立一体化的优化模型,利用凸优化相关理论对模型进行必要的处理以保证模型的全局最优性。而对于一些只需要近

优解的场合,可以考虑应用一些启发式、机器学习的计算方法,通过并行计算技术进行加速求解。

5.3 高效一体化的输配网暂态仿真和稳定性分析方法

目前,输配网混合的暂态仿真和稳定性分析主要基于主从分裂模型分区迭代计算,输配网的仿真和稳定性分析往往被割裂开,计算效率较低,实用性不强,在实时性要求较高的场合往往不适用。

为了提高计算效率,保证算法的实用性,需要建立适用于一体化仿真和稳定性分析的电网模型。在仿真和分析过程中,可对部分区域实施必要的等值处理,避免反复迭代计算。此外,相关并行计算技术也可以应用到仿真和分析过程中以提高计算效率。

5.4 考虑直流配电网的交直混合输配网一体化建模和分析方法

随着新能源和电力电子技术的发展,现有交流配电网在稳定性、高效性和经济性等方面面临严峻的挑战^[62]。近年来,由于直流配电网具备供电容量大、线路损耗小、无需无功补偿、电能质量好、电源和负载接入适应性强、电磁辐射小等诸多优点,受到广泛关注^[63-66]。很多学者对直流配电网中的系统架构、控制技术、保护技术等问题进行了深入研究,认为直流配电网将在未来具有广阔的发展前景^[66]。

文献[67]在突显直流配电网技术优势的同时,介绍了一种直流配电网的建模方法,首先分析了含分布式电源的直流配电网典型结构,研究各组成部分工作特性;接着建立直流配电网各单元的数学模型,包括永磁直驱变速风电机组模型、储能蓄电池模型、交直流负荷模型、各类型变流器模型和电网模型;最后研究了直流配电网中变流器的作用及控制方法。

直流配电网的应用将对输配网一体化电网产生巨大影响。在省地县一体化的运行调度格局下,如何针对考虑直流配电网的交直混合的输配网进行一体化建模和分析将成为重要课题,具有高度前瞻性。

6 结语

本文结合国内外研究现状,从输配网一体化

建模与分析的必要性、输配网一体化建模与分析面临的困难、输配网一体化建模方法、输配网一体化分析方法等四个方面进行了综述。

(1) 为了精确处理输配网间的耦合性, 进一步提高输配网运行的安全性和稳定性, 适应输配网一体化调度和管理的需求, 开展输配网一体化建模与分析具有重要意义。由于输配电网性质的巨大差异, 在建模方法、精度、计算效率等方面面临诸多困难。输配网一体化建模和分析实质就是通过有机统一输配电网的差异, 协调处理两者间的耦合性。

(2) 主从分裂模型和区域等值模型是 2 种常见的输配网一体化模型, 其思路均是对输配网进行分区建模。主从分裂模型计算比较精确, 但需交替迭代计算, 存在收敛性问题; 区域等值模型计算量小, 无收敛性问题, 但对等值模型的精确程度要求高, 传统的等值方法往往不能满足计算精度的要求。

(3) 针对输配网一体化分析, 学者在潮流计算、运行风险评估、优化调度、稳定性分析等领域取得了初步成果。同时, 一些高性能计算技术也被初步应用到一体化分析计算过程中。

随着智能电网的不断建设和完善, 输电网和配电网的耦合性将进一步增强, 省地县一体化的运行调度态势也将逐步形成。在这样的趋势下, 研究和开展输配网一体化建模和分析方法具有必要性和紧迫性。把数值计算、并行计算、机器学习等领域的新理论、新技术、新方法应用到输配网一体化的计算过程中, 有望满足未来输配网一体化电网的计算精确度和实时性的需求, 为省地县一体化运行调度提供坚实的保障。

参考文献:

- [1] 贾黎亮, 杨平礼, 闫馨予. 省地县一体化调度安全保障评估系统的设计及其实现[J]. 变频技术应用, 2016(5): 17-20.
- [2] 国内首套省地县一体化调控管理系统通过现场验收[J]. 电力系统通信, 2011(6):34.
- [3] 国内首套省地县一体化调控管理系统在江苏镇江投运[J]. 华东电力, 2011(9):1532.
- [4] 关于全面推进“三集五大”体系建设的意见[N]. 国家电网报, 2012-01-09(2).
- [5] 廖胜利, 刘晓娟, 刘本希, 等. 省地县一体化电力调度管理系统分级用户权限方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18):88-92.
- [6] 张龙, 孙大雁, 赵普, 等. 基于大运行省地县一体化调度运行管理系统的建设[J]. 电力信息化, 2012, 10(5):8-12.
- [7] 周遥. 省地县一体化电力调度管理系统分级用户权限方案[J]. 农村电气化, 2016(5):45-46.
- [8] 高强, 金啸虎, 吴利锋. 浙江电网省地县一体化集中监控管理体系建设[J]. 浙江电力, 2015, 34(4):57-60.
- [9] 孙宏斌, 张伯明. 全局电力管理系统(GEMS)的新构想[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(5):6-8.
- [10] 刘涛, 米为民, 陈郑平, 等. 适用于大运行体系的电网模型一体化共享方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 36-41.
- [11] 许洪强, 姚建国, 於益军, 等. 支撑一体化大电网的调度控制系统架构及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6):1-8.
- [12] 郑宗强, 韩冰, 闪鑫, 等. 输配电网高级应用协同运行关键技术分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6):122-128.
- [13] SUH J, HWANG S, JANG G. Development of a transmission and distribution integrated monitoring and analysis system for high distributed generation penetration[J]. Energies, 2017, 10(9):1282.
- [14] 郭志红, 韩学山, 李文博, 等. 适应分布式电源的输配电网协调潮流算法[J]. 山东电力技术, 2014, 41(1):1-6.
- [15] JAIN H, RAHIMI K, TBAILEH A, et al. Integrated transmission & distribution system modeling and analysis: need & advantages[C]//Power and Energy Society General Meeting. New York, USA: IEEE, 2016.
- [16] LI Z S, WANG J H, SUN H B, et al. Transmission contingency analysis based on integrated transmission and distribution power flow in smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6):3356-3367.
- [17] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 发输配全局潮流计算第一部分: 数学模型和基本算法[J]. 电网技术, 1998, 22(12): 39-42.
- [18] SUN H B, GUO Q L, ZHANG B M, et al. Master-slave-splitting based distributed global power flow method for integrated transmission and distribution analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3):1484-1492.
- [19] 丰颖, 负志皓, 孙景文, 等. 输配协同的配电网态势快速感知方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12):37-44.
- [20] HUANG Q H, VITTAL V. Integrated transmission and distribution system power flow and dynamic simulation using mixed three-sequence/three-phase modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5):3704-3714.
- [21] 李筠盛. 输电网与配电网全网一体化仿真研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.

- [22] MARINHO J M T, TARANTO G N. A hybrid three-phase single-phase power flow formulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3):1063–1070.
- [23] JAIN H. Dynamic simulation of power systems using three phase integrated transmission and distribution system models case study comparisons with traditional analysis methods[D]. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2016.
- [24] JAIN H, PARCHURE A, BROADWATER R P, et al. Three-phase dynamic simulation of power systems using combined transmission and distribution system models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(16):4517–4524.
- [25] 孙宏斌, 郭焔, 张伯明. 含环状配电网的输配全局潮流分布式计算[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(13):11–15.
- [26] 赵晋泉, 徐鹏, 高宗和, 等. 基于子网边界等值注入功率的异步迭代分布式潮流算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18):11–15.
- [27] 张海波, 张伯明, 孙宏斌. 基于异步迭代的多区域互联系统动态潮流分解协调计算[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24):1–5.
- [28] 李文博. 输配电网潮流与优化的理论研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [29] 颜伟, 何宁. 基于 ward 等值的分布式潮流计算[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(11):36–40.
- [30] 高明, 赵月辉, 吴任博, 等. 基于网络分区的多适配性输配网协同潮流算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23):63–68.
- [31] 孙宏斌, 张伯明, 相年德, 等. 发输配全局潮流计算第二部分: 收敛性、实用算法和算例[J]. 电网技术, 1999, 23(1):50–53.
- [32] 陈羽, 刘东, 廖怀庆, 等. 网格计算环境下输配电网联合潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5):42–47.
- [33] 鲁跃峰, 刘东, 蒋利明, 等. 全电压序列电网规划中的输配电网联合潮流计算[J]. 华东电力, 2010, 38(3):345–348.
- [34] SUN H B, ZHANG B M. Distributed power flow calculation for whole networks including transmission and distribution[C]//2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, New York, USA: IEEE, 2008: 1–6.
- [35] LI K Q, HAN X S, LI W B, et al. Unified power flow algorithm of transmission and distribution network[C]//2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications. New York, USA: IEEE, 2017: 257–261.
- [36] 贾晓峰, 颜伟, 周家启, 等. 复杂电网的分层解耦潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7):56–61.
- [37] LI Z S, WANG J H, SUN H B, et al. Transmission contingency screening considering impacts of distribution Grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1659–1660.
- [38] LI Z S, GUO Q L, SUN H B, et al. Coordinated economic dispatch of coupled transmission and distribution systems using heterogeneous decomposition[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6):4817–4830.
- [39] LI Z S, GUO Q L, SUN H B, et al. Coordinated economic dispatch of coupled transmission and distribution systems using heterogeneous decomposition[C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Chicago: IEEE, 2017.
- [40] LI Z S, GUO Q L, SUN H B, et al. A New LMP-sensitivity-based heterogeneous decomposition for transmission and distribution coordinated economic dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2):931–941.
- [41] LIN C H, WU W C, CHEN X, et al. Decentralized dynamic economic dispatch for integrated transmission and active distribution networks using multi-parametric programming [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5):4983–4993.
- [42] 朱泽磊, 程鑫, 杨桂钟, 等. 基于母线负荷预测改进的省地协同发电计划优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3):665–675.
- [43] LI Z S, GUO Q S, SUN H B, et al. Coordinated transmission and distribution AC optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2):1228–1240.
- [44] SINGHAL N G, HEDMAN K W. Iterative transmission and distribution optimal power flow framework for enhanced utilisation of distributed resources [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(11):1089–1095.
- [45] 文云峰, 郭创新, 郭剑波, 等. 多区互联电力系统的分散协调风险调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3724–3733.
- [46] WANG H Y, SONG Y K, HUANG S W, et al. Hybrid transient simulation platform for interconnected transmission and distribution system based on powerfactory and PSASP[J]. The Journal of Engineering, 2017(13):2053–2056.
- [47] HUANG R K, FAN R, DAILY J, et al. Open-source framework for power system transmission and distribution dynamics co-simulation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(12):3152–3162.
- [48] ARISTIDOU P, VAN CUTSEM T. A parallel processing approach to dynamic simulations of combined transmission and distribution systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 72:58–65.
- [49] ARISTIDOU P, VAN CUTSEM T. Dynamic simulations of

- combined transmission and distribution systems using decomposition and localization[C]//2013 IEEE Grenoble Conference, New York, USA: IEEE, 2013.
- [50] ARISTIDOU P, VAN CUTSEM T. Dynamic simulations of combined transmission and distribution systems using parallel processing techniques[C]//2014 Power Systems Computation Conference. New York, USA: IEEE, 2014: 1-7.
- [51] LIU H F, JIN L C, LE D, et al. Impact of high penetration of solar photovoltaic generation on power system small signal stability[C]//2010 International Conference on Power System Technology. New York, USA: IEEE, 2010: 1-7.
- [52] ZHAO J Q, FAN X, LIN C N, et al. Distributed continuation power flow method for integrated transmission and active distribution network[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2015, 3(4): 573-582.
- [53] SUN H B, ZHANG B M. Global state estimation for whole transmission and distribution networks[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 74(2): 187-195.
- [54] SCHMIDT H P, GUARALDO J C, LOPES M D M, et al. Interchangeable Balanced and Unbalanced Network Models for Integrated Analysis of Transmission and Distribution Systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2747-2754.
- [55] 冯永青, 李鹏, 陈刚, 等. 基于模型拼接与外网等值的南方电网在线模型协调方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 101-104.
- [56] 朱泽磊, 罗治强, 程鑫, 等. 基于电网模型等值的省地协同发电计划优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4333-4343.
- [57] HANSEN J, EDGAR T, DAILY J, et al. Evaluating transactional controls of integrated transmission and distribution systems using the Framework for Network Co-Simulation[C]//2017 American Control Conference. Seattle, USA: IEEE, 2017: 4010-4017.
- [58] MALEKPOUR A R, ABBASI A R, SEIFI A R. A new coordinated approach to load shedding in integrated transmission and distribution systems[J]. International Review of Electrical Engineering, 2010, 5(3): 1172-1182.
- [59] KALSI K, FULLER J C, TUFFNER F K, et al. Integrated transmission and distribution control[J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2013(1): 69.
- [60] HASSAN A, DVORKIN Y. Energy storage siting and sizing in coordinated distribution and transmission systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1692-1701.
- [61] 段刚, 余贻鑫. 输配电系统综合规划的全局优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 109-113.
- [62] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.
- [63] STARKE M, LI F X, TOLBERT L M, et al. AC vs. DC distribution: Maximum transfer capability[C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh: IEEE, 2008: 1-6.
- [64] STARKE M, TOLBERT L M, OZPINECI B. AC vs. DC distribution: A loss comparison[C]//2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago: IEEE, 2008: 1-7.
- [65] DASTGEER F, KALAM A. Efficiency comparison of DC and AC distribution systems for distributed generation[C]//Power Engineering Conference, Australasian Universities. [S.l.]: IEEE, 2009: 1-5.
- [66] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.
- [67] 于明. 含分布式电源的直流配电网协调控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
-
- 收稿日期: 2019-09-12
- 作者简介: 余佳音(1987), 女, 工程师, 研究方向为电力系统自动化技术。
- 董树锋(1982), 男, 副教授, 研究方向为输电一体化电网分析、配电网建模和分析。(通讯作者)
- (本文编辑: 方明霞)