

基于能源互联的智能配电网规划与评价方法研究

能源互联的智能电网中包含分布式能源、集中式能源和以电动汽车为主的互动型负荷的特点，分析了能源互联的智能配电网与传统配电网的区别，详述了基于负荷预测曲线和互动型负荷影响的能源互联的智能配电网规划、以可靠性为中心的能源互联的智能配电网规划和基于最大供电能力的能源互联的智能配电网规划，以及对规划结果的评价方法。

李树泉/国家电网客服中心

余家驹/北京国电通网络技术有限公司



李树泉/高级工程师

0 引言

能源是人类生产、生活活动的重要基础，而化石能源有限的储量不能支撑人类发展的可持续性，并且化石能源的大规模低效使用也对环境产生了巨大的污染。能源危机和环境污染促使可持续、清洁和高效的能源系统成为能源行业的热点研究领域。随着分布式能源技术、集中式能源技术和互动负荷技术的发展，先进的信息通信和控制技术被广泛地应用于能源系统中，形成了多种能源互联的技术体系——能源互联网。

能源互联这一概念，于2011年在美国学者杰瑞米·里夫金所著的《第三次工业革命》中提出，能源互联实现可再生能源、电动汽车等的广泛接入，是未来能源系统的发展方向；而智能配电网是能源互联的核心基础，对智能配电网进行优化规划是能源互联网从理论到工程实践的基础。只有在现今的、合理的智能配电网规划理论的指导下，大规模的能源互联网建设才能全面地顺利实施。

考虑到能源互联下智能配电网中包含分布式能源、集中式能源和以电动

汽车为主的互动型负荷的特点，本文对能源互联的智能配电网与传统配电网的区别进行了分析，基于这些区别详述了能源互联的智能配电网的规划方法，包括：基于负荷预测曲线和互动型负荷影响的能源互联的智能配电网规划、以可靠性为中心的能源互联的智能配电网规划和基于最大供电能力的能源互联的智能配电网规划，并提出对规划结果的评价方法。

1 传统配电网规划方法及评价方法综述

目前传统电网的规划方法以《配电网规划设计技术导则》为依据，从电网数据采集开始，对现状电网进行评估，对电网内空间负荷和状态负荷进行预测，并分析当前电网内电力平衡。根据负荷总量预测和电力的平衡，对变电站选址定容。根据选址定容结果，实施高压配电网规划，先对规划结果依据技术导则判断其合理性和可实施性，根据判断结果优良，重新对变电站选址定容方法和高压配电网规划方法修改。在完成配电网规划后，用同样的方式对中压配电网进行规划。当完成高压配电网规划和中压配电网规划后，并按照评估结果判定总体规划结果满足预先要求后，即可完成传统配电网的规划。传统配电网规划方法如图1所示。

现状电网评估体系中，以城市规划与经济发展中的城市情况、现状电网图形中网络架构和现状电网数据的设备参

关键词/Keywords

能源互联 ·
配电网 ·
规划技术 ·
评价方法 ·

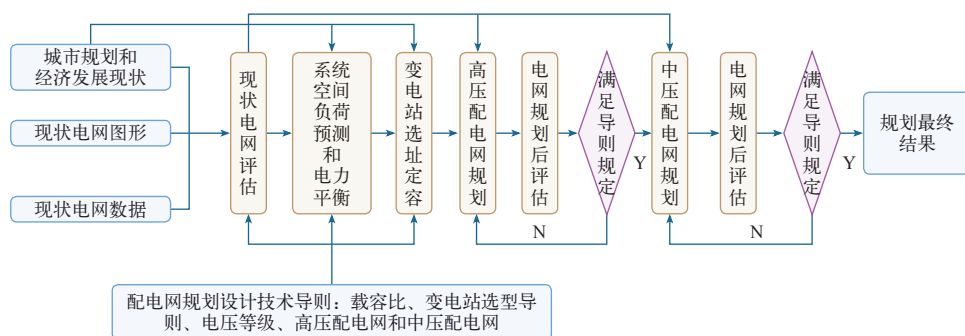


图1 传统配电网规划方法概述图

数和统计数据为依据，参照《配电网规划设计技术导则》，得出电网现状负荷数据和变电站容量数据，以及当前配电网中的配电薄弱环节。系统空间负荷预测体系以城市规划与经济发展中的城市情况和经济增长，结合现状电网评估得出的现状负荷为输入，得出当前电网的空间负荷以及总负荷。当前电网的总负荷结合变电站容量和技术导则，可得当前电网电力平衡的电力盈亏数据。电力盈亏数据和空间负荷数据结合城市规划中土地使用情况，可以判定变电站的选址定容规划方案。结合新建变电站位置、容量改造、扩建变电站容量和当前配电网中的薄弱环节，可制定适当的高压配电网规划方案。根据规划方案和规划数据，对配电网进行满足导则的评估。若当前高电压配电规划满足导则规定，即可进行中压部分的配电网规划，否则重新进行高压部分规划。对于中压配电网的规划流程，与高压配电网规划流程一致，同为基于满足导则规定的判定方法。在完成中压配电网的规划后，则可以判定传统配电网的规划已按照《配电网规划设计技术导则》完成。

根据配电网服务对象，配电网规划工作水平的衡量标准应围绕用户、负荷、设备以及效益等，判定指标主要为配电网的规划目标的明确性、配电网的安全性、配电网的可靠性和配电网经济性4个指标。这4项评价指标保障了配电网中的负荷供电和供电可靠性以及综合电压的合格率，同时保障了配电线路和变压器的安全通过率，保证降低用户停电频率及停电时间，也确保配电网实施过程中降低综合线损率和扩大投资效益。

2 能源互联的智能配电网规划流程和方法

能源互联的智能配电网是相对于传统配电网而言。能源互联的智能配电网的规划问题与传统配电网的规划不同之处在于，在能源互联的智能配电网的规划中，需要考虑以热电联产和天然气为主的集中式电源规划、以清洁能源为主的分布式电源规划和以交通中电动汽车储能设备等的柔性负荷为主的互动负荷。除去在考虑时序特性的电力电量平衡方面的区别，能源互联的智能配电网规划在变电站选址定容方面，也需考虑到集中式电源布点决策，以及在中压配电网规划之后，分布式电源与互动型负荷的协同规划问题。如果将传统配电网规划中的变电站选址定容策略作为复杂系统优化规划问题的一项，那么能源互联的智能配电网规划问题中同样包括这个问题。同时，可以将上述集中式能源、分散式能源和柔性负荷问题归结为网络规划问题，这同样是能源互联的智能配电网规划问题的一个重要部分。

为降低这两个问题给智能电网规划工作带来的难度，通常可以在规划阶段，将变电站与负荷的网架形象描述为简单的直线，并将智能电网的网络规划问题中的变电站选址定容问题作为已知变量，按照已知的变量来进行规划。通过这两种简化手段的迭代求解，可得出智能电网规划复杂问题的求解。

根据能源互联的智能配电网和传统配电网的区别，可以在传统配电网规划方法中作适当添加改动，形成能源互联的智能配电网规划方法。能源互联的智能配电网规划方法概述图如图2所示。

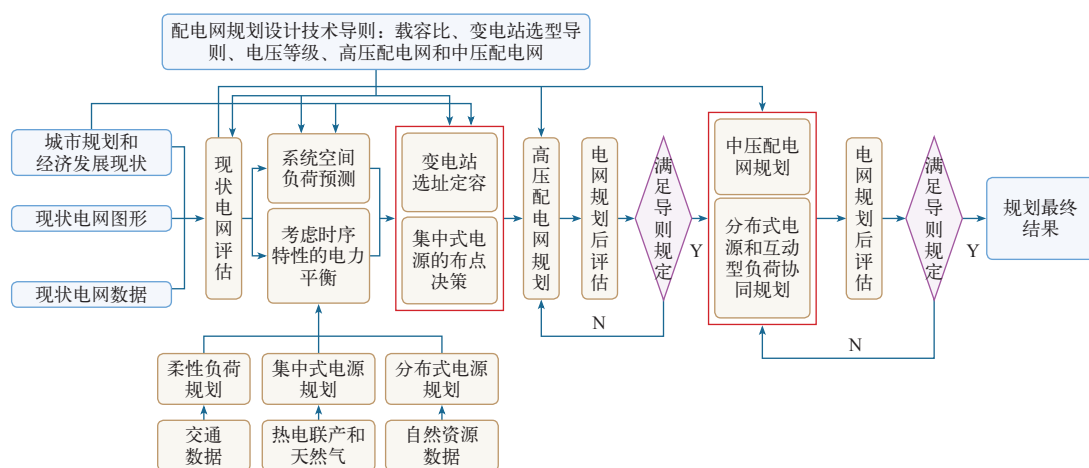


图2 能源互联的智能配电网规划流程

由于能源互联的智能配电网的规划方法是基于传统配电网而来，所以在此只对能源互联的智能配电网规划方法中的特点作详细说明。在交通数据中，主要提取交通规划中电动汽车布局信息，并通过柔性负荷系统得出互动负荷数据。集中式电源规划系统和分布式电源规划系统将发电容量，连同互动负荷数据，作为考虑时序特性的电力电量平衡系统的输入。由于集中式电源的分布在配电网中的作用与传统变电站的作用类似，所以在传统配电网规划方法中的变电站选址定容阶段，能源互联的智能配电网规划方法需加入集中式电源布点决策，为集中式电源在配电网规划中安置相应位置。考虑到分布式电源与互动型负荷对能源互联的智能配电网的影响，在中压配电网规划之后，加入分布式电源与互动型负荷协同规划系统，为分布式电源和互动型负荷在配电网中找到相应规划方案。

具体的能源互联的智能配电网规划方法可分为基于负荷预测曲线和互动型负荷影响的规划方法、以可靠性为中心的规划方法和基于最大供电能力的规划方法等多种较为成熟的规划方法。下文将详细阐述上文中提到的三种方法。

2.1 基于负荷预测曲线和互动型负荷影响的规划方法

参考能源互联的智能配电网规划流程中的“考虑时序特性的电力平衡”可知，能源互联的智能配电网中的负荷预测是对负荷时序特性的预测，其直接影响范围包含配电网中除去高压配电网规划外的所有规划模块。因此对负荷时序特性的研究在配电网规划中举足轻重。能源互联的智能配电网与传统配电网不同的另一点是互动型负荷的接入，因此在统筹规划时，需要将互动型负荷同其余负荷和发电单元一起协调规划。配电网规划如图3所示。

这个规划方法中只涉及中压配电网规划和分

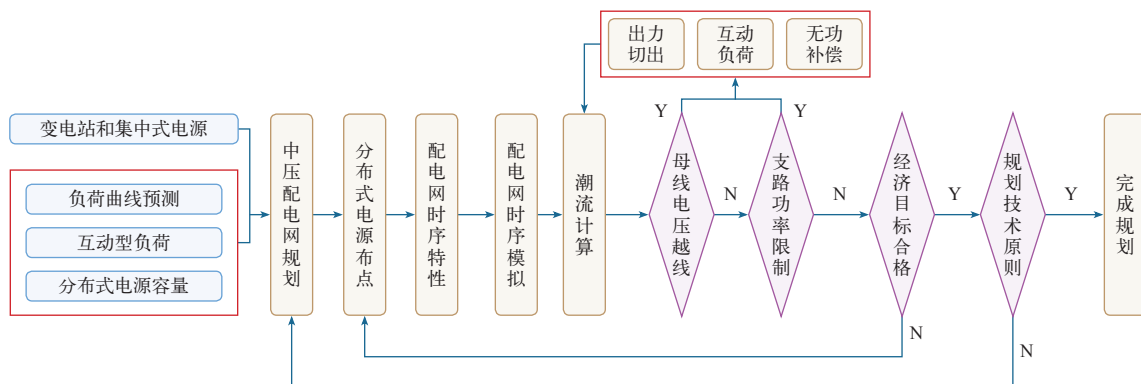


图3 基于负荷预测曲线和互动型负荷影响的规划方法

布式电源的布点决策，将变电站的选址定容和集中式电源看成已规划好部分。在判断母线电压和支路功率均超出边界值时，采取切出部分分布式电源的有功出力或部分负荷、调整互动型负载以及调整无功补偿设备的投切容量等手段，限定电压和功率在规划条件内。分布式电源布点决策的判定标准以规划方案的经济性良好为目标，控制建设成本。当分布式电源出力随时成本或线损成本过高时，需重新规划布点。最终的规划方案还需满足规划技术原则。

2.2 以可靠性为中心的规划方案

以可靠性为中心的配电网规划方法主要是通过对配电网内薄弱环节的确定，提升配电网的可靠性。现阶段对配电网可靠性评估的方法主要是故障树最小割集和最小经集法。就配电网可靠性定义的本质而言，是指配电网内所有负荷因内外部故障或预安排（如施工或调电等计划型停电，临时检修或申请等临时型停电和限电或供电不足等限电措施）而导致停电概率和停电时间的集合。基于最小割集法的配电网可靠性分析过程为先分析配电网中的负荷点，寻找涉及负荷点的径集和割集，割集内元素为并联关系，割集间为串联关系，计算负荷点的可靠性，最终由各负荷点可靠性的叠加得到配电网的可靠性。基于这种方法对配电网可靠性的提升的方法如图4所示。

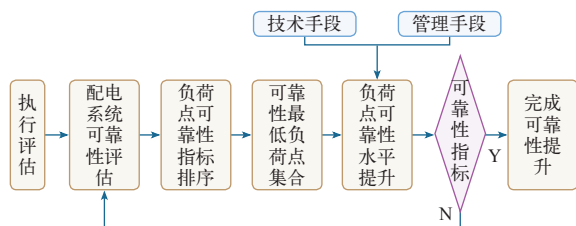


图4 以可靠性为中心的规划方法

图4中的技术手段主要为配电自动化技术、状态检修技术和不停电作业技术。其中不停电技术是目前能减少预安排停电的最有效手段。管理手段包括加强转供电管理和加强需求侧管理。

2.3 基于最大供电能力的规划方法

在基于最大供电能力的配电网规划方法中，

需要考虑的主要因素为判断配电网中是否存在无电区、配电网最大供电能力是否大于配电网总负荷、主变压器负荷是否与配电网最大供电能力匹配以及配电网是否满足“N-1”可靠性要求。此种规划方法图解如图5所示。

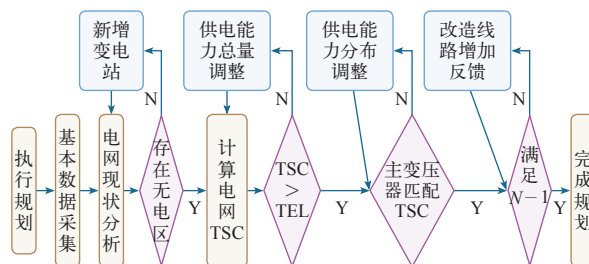


图5 基于最大供电能力的规划方法

上文提到的对配电网的规划方法中四种判定条件并无固定优先级。4种判定是对配电网中可能出现问题的查找与解决方法。具体解决方法是当配电网中存在无电区时，需要新增变电站满足供电需求。这种情况主要是因为电网中出现较大新增负荷，或新增负荷距离现有变电站距离过远。当配电网最大供电能力低于电网中负荷总量时，提高配电网供电能力总量。这种情况与上一种类似，是在新增负荷无法被当前电网消纳，但可以在进一步挖掘电网架构后的TSC消纳。当主变压器负荷无法满足配电网最大供电能力时，调整配电网能力分布。这种情况是在配电网最大供电能力大于规划总负荷后，新增负荷可以在电网结构不发生改变的状态下被消纳，但并不能与TSC匹配，此时考虑负荷的再分配。在当前配电网无法满足“N-1”可靠性要求时，通过改造线路或增加反馈来提高配电网供电可靠性。

3 能源互联的智能配电网规划评价与技术原则

配电网是由供电单位架设的联系供能单位、个体与用能单位及个体的桥梁。所以在评价配电网的规划时，其评价点主要围绕用户、负荷、设备和效益。针对传统配电网规划的评价标准主要为配电网规划目标的明确性、配电网的安全性、配电网的可靠性和配电网经济性4个指标。考虑

到智能电网与传统电网的区别,其包含集中式电源、分布式电源和互动型负荷,配电网的内涵和外延都得到了扩展。因此,传统配电网规划的评价方法在能源互联的智能配电网规划方法中表现出局限性。为弥补这种局限性,在智能电网规划方法的评价标准中,出现对供热网和配电网协同的评价,对天然气和配电网协同的评价,对可再生能源和分布式能源的消纳的评价以及对柔性负荷在配电网中影响大小的评价等。具体来说,能源互联的智能配电网规划结果应保证供电安全性、可靠性和电压质量,在可持续发展方向,应注重新能源的消纳量和可持续发展的能力。可持续发展能力可表述为配电网变电容量比、中高压配电网变电容量比和中压线路平均装接配电变压器容量,保障设备的合理利用率 and 较高的技术装备水平。从社会效应角度,要保障一定的经济性。经济性主要体现在投入产出比、配电网综合线损率和中高压配电网峰谷差偏差率等方面。

能源互联的智能配电网的组成为能源互联网和电网,因此在分析能源互联的智能配电网规划技术原则时,应着重分析能源互联的智能配电网中能源互联网对配电网规划的影响(其他还包括电网结构和设备选型、电网智能化以及规划计算分析)。经数据参考,能源互联的智能配电网中能源互联网对配电网规划的影响可归结为以下各点。①能源互联网不影响配电网规划中可靠性标准和综合电压合格率;②能源互联网不影响配电网规划中的电压等级序列;③能源互联网不影响配电网规划中的供电安全标准;④因地制宜,根据区域负荷变化,需调整容载比;⑤因能源互联的智能配电网中分布式能源的接入,使电网中短路电流增加,因此在能源互联的智能配电网规划中需考虑使用较传统配电网中更为丰富的短路电流限制手段;⑥能源互联网不影响电网规划技术中心的无功补偿和电压调整;⑦智能电网不影响电网规划中的电压质量和对电压的监测;⑧能源互联网不影响电网规划中的中性接地点;⑨分布式能源和互动式负荷的加入增加了继电保护和自动装置的复杂度;⑩能源互联网对用户接入不造成影响。

4 结束语

本文从能源互联的智能配电网的特点出发,对能源互联的智能配电网中因柔性负荷、集中式电源和分布式电源的出现而导致配电网规划出现的局限性作出调整,在电力平衡方面增加电力的时序特性,以此规范能源互联的智能配电网规划流程。详述了基于负荷预测和互动型负荷影响的规划方法、以可靠性为中心的规划方法和基于配电网最大供电能力的规划方法,最后提出了对规划方法的评价标准。

参考文献

- [1] 豆田田,刘慧丽.浅析新能源发电接入及对电网规划的影响[J].低碳世界,2016(26):43-44.
- [2] 王克峰,梁修巩,黄长杰,等.合肥地区新能源发电规划分析[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2014(3):97-100.
- [3] 彭波,陈旭,徐乾耀,等.面向新能源消纳的电网规划方法初探[J].电网技术,2013,37(12):3386-3391.
- [4] 董金星.新能源快速发展背景下梅州地区电网规划问题的探究[J].低碳世界,2016(30):24-25.
- [5] 魏榆扬,周步祥,彭章刚.基于区间数的改进NSGA-II算法在微电网优化调度中的应用[J].电力电容器与无功补偿,2017,38(1):117-112.
- [6] 谢青洋,王韶,邓先芳,等.基于灰靶决策和NSGA-II的配电系统分布式电源多目标优化[J].电测与仪表,2017,54(6):100-105.
- [7] 曾博.面向低碳经济的主动配电网综合资源规划与决策理论[D].北京:华北电力大学,2014.
- [8] 李文革.电网规划管理中存在的问题及措施[J].通信世界,2017(23):207-208.
- [9] 朱青.协同新能源发展的电网规划关键技术研究[J].低碳世界,2016(34):29.
- [10] 李峰.智能电网条件下的多目标输电网规划浅述[J].低碳世界,2016(33):49-50.
- [11] 李卫彬.负荷预测在城镇电网规划中的应用[J].自动化应用,2016(12):127-129.

(收稿日期:2018-02-21) EA