

智能电网技术丛书



ACTIVE
POWER GRID TECHNOLOGY

主动式电网技术

陈德鹏 韩 坚 刘 松 编著

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

网技术丛书



ACTIVE
POWER GRID TECHNOLOGY

主动式电网技术

陈德鹏 韩 坚 刘 松 编著

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇 江

图书在版编目(CIP)数据

主动式电网技术 / 陈德鹏, 韩坚, 刘松编著. — 镇江 : 江苏大学出版社, 2018. 11
ISBN 978-7-5684-0987-2

I. ①主… II. ①陈… ②韩… ③刘… III. ①智能控制—电网 IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 263933 号

主动式电网技术

Zhudong Shi Dianwang Jishu

编 著 者/陈德鹏 韩 坚 刘 松

责任编辑/张小琴

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press. ujs. edu. cn

排 版/镇江市江东印刷有限责任公司

印 刷/镇江文苑制版印刷有限责任公司

开 本/710 mm×1 000 mm 1/16

印 张/11.25

字 数/230 千字

版 次/2018 年 11 月第 1 版 2018 年 11 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0987-2

定 价/48.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

编委会

主 任 颜 日

副主任 熊炳成 叶鹤林

委 员 刘 斌 彭 恺 陈 维

王文博 薛擎昊 文检峰

前 言

随着经济的发展、社会的进步、科技和信息化水平的提高,以及全球资源和环境问题的日益突出,电网发展面临新课题和新挑战。依靠现代信息、通信和控制技术,大力发展坚强的智能电网,以适应未来可持续发展的要求,已成为国际电力发展的现实选择。

“坚强”智能电网是以特高压为骨干网架、各级电网协调发展的坚强网强为基础,以通信信息平台为支撑,具有信息化、自动化、互动化特征,包含电力系统的发电、输电、变电、配电、用电和调度的各个环节,覆盖所有电压等级,实现“电力流、信息流、业务流”的高度一体化融合的现代电网。

坚强的内涵是指具有坚强的网架结构、强大的电力输送能力和安全可靠的电力供应。坚强的网架结构是保障电力安全可靠供应的基础;强大的电力输送能力,是与电力需求快速增长相适应的发展要求,是坚强的重要内容;安全可靠的电力供应是经济发展和社会稳定的前提,是电网坚强内涵的具体体现。

以坚强为基础来发展智能电网,可以提高电网防御多重故障、防止外力破坏和防灾抗灾的能力,能够增强电网供电的安全可靠性;可以提高电网对新能源的接纳能力,推动分布式和大规模新能源的跨越式发展;可以提高电网更大范围的能源资源优化配置能力,充分发挥其在能源综合运输体系中的重要作用。因此,发展智能电网必须以坚强为基础。

为了构建更为坚强的智能电网,提高电力系统的可靠性,需要改变传统电网



“被动”的局面。本书主要从电力生产的规划、运行、保护、检修、营销这五大环节入手,研究各环节的主动式电网技术,让电网更“主动”、更坚强、更智能。本书共6章,主要包括:概论、主动式配电网规划技术、主动式电网运行技术、主动式电网保护技术、主动式电网检修技术、主动式电网营销技术。

本书不仅仅是一本主动式电网技术的基础读物,而且对读者了解和研究主动式电网技术前沿课题也有所裨益,还融入了编者从业经验和个人之见。限于专业水平,书中存在不妥之处在所难免,敬请读者批评指正!

编 者

2018年8月

目 录

第1章 概 述 / 001

- 1.1 主动式配电网规划技术 / 001
- 1.2 主动式电网运行技术 / 001
- 1.3 主动式电网保护技术 / 002
- 1.4 主动式电网检修技术 / 002
- 1.5 主动式电网营销技术 / 003

第2章 主动式配电网规划技术 / 004

- 2.1 引言 / 004
- 2.2 主动配电网规划的需求 / 004
- 2.3 主动配电网规划与传统配电网规划 / 005
- 2.4 主动配电网规划体系结构 / 005
- 2.5 主动配电网规划原则研究思路 / 006
- 2.6 主动配电网二次设备规划原则 / 008
 - 2.6.1 自动化系统建设基本原则 / 008
 - 2.6.2 通信系统建设基本原则 / 009
 - 2.6.3 安全防护建设基本原则 / 009
- 2.7 主动配电网负荷预测 / 009
 - 2.7.1 主动配电网负荷分类 / 009



- 2.7.2 含友好负荷的主动配电网负荷预测方法 / 011
- 2.8 高密度水光互补型工业园区主动配电网 / 012
 - 2.8.1 运行与规划双态数据整合池 / 013
 - 2.8.2 “三位一体”主动规划 / 014
 - 2.8.3 配电网优化调度控制 / 015
 - 2.8.4 源网荷协调消纳方式 / 015
 - 2.8.5 异构通信组网 / 015
 - 2.8.6 阳光互动服务平台 / 016
- 2.9 主动配电网规划中的气象防灾 / 017
 - 2.9.1 气象相关的规划设计基础工作 / 017
 - 2.9.2 气象相关的发电环节规划设计 / 018
 - 2.9.3 气象相关的输电环节规划设计 / 019
 - 2.9.4 气象相关的配电环节规划设计 / 023

第3章 主动式电网运行技术 / 026

- 3.1 引言 / 026
- 3.2 电网面临的主要气象灾害 / 028
 - 3.2.1 雷电 / 029
 - 3.2.2 冰灾 / 029
 - 3.2.3 风灾 / 030
 - 3.2.4 山火 / 031
 - 3.2.5 地质灾害 / 031
 - 3.2.6 其他恶劣天气 / 032
- 3.3 输电线路时变故障率计算 / 032
 - 3.3.1 输电线路故障事件时间相依特性分析 / 032
 - 3.3.2 按历史同期时间计算线路故障率 / 033
- 3.4 输电线路时变故障率模拟 / 034
 - 3.4.1 输电线路时变故障率分布函数假设 / 034
 - 3.4.2 具有多峰周期特性的时变故障率函数拟合 / 035
 - 3.4.3 具有单峰周期特性的时变故障率函数拟合 / 035

- 3.5 输电线路强迫停运时间分布特征模拟 / 038
 - 3.5.1 描述强迫停运时间的常用概率分布函数 / 038
 - 3.5.2 气象相关的线路强迫停运时间概率分布拟合 / 038
- 3.6 基于输电线路时变故障率函数的风险分析 / 040
 - 3.6.1 应用时变故障率评估电网时变风险 / 040
 - 3.6.2 算例测试与结果分析 / 041
- 3.7 输电线路风偏放电概率预测与风险预警 / 044
 - 3.7.1 风偏放电机理与风偏角计算模型 / 044
 - 3.7.2 风预报准确性对风偏角计算的影响分析 / 047
 - 3.7.3 基于准确率先验分布的预报风模型 / 050
 - 3.7.4 输电线路风偏放电概率预警方法 / 052
 - 3.7.5 案例分析 / 054
- 3.8 输电线路易舞气象条件预测与舞动风险预警 / 058
 - 3.8.1 输电线路舞动预警原理 / 058
 - 3.8.2 基于 SVM 分类器的易舞气象条件预测模型 / 060
 - 3.8.3 基于 AdaBoost 分类器的输电线路舞动预警模型 / 064
 - 3.8.4 预测性能检验方法 / 068
 - 3.8.5 算例分析 / 069

第4章 主动式电网保护技术 / 073

- 4.1 引言 / 073
- 4.2 设备故障现象的再认识 / 075
 - 4.2.1 故障原因 / 075
 - 4.2.2 故障差异 / 076
 - 4.2.3 故障可预测性与可控性 / 077
- 4.3 设备安全状态演化过程及安全域 / 077
- 4.4 电气设备主动保护与控制策略 / 079
 - 4.4.1 继电保护的主动性体现 / 079
 - 4.4.2 主动保护与控制的目标及定义 / 080
 - 4.4.3 主动保护与控制的功能架构 / 081



4.4 构建主动保护与控制所需的关键技术 / 082

4.4.1 主动感知与预测技术 / 082

4.4.2 安全域建模与动态辨识技术 / 083

4.4.3 主动保护与协同控制技术 / 083

4.5 主动保护与控制的可行性分析 / 084

4.5.1 输变电设备在线监测技术提供手段 / 084

4.5.2 电力系统的冗余性提供实施空间 / 085

第5章 主动式电网检修技术 / 086

5.1 引言 / 086

5.2 基于历史数据的变电主设备例行检修决策方法 / 087

5.2.1 基于威布尔分布的变电主设备故障率模型 / 087

5.2.2 计及检修过程随机性的变电主设备可靠性评估方法 / 090

5.2.3 基于动态时间窗口的检修周期优化 / 093

5.2.4 算例分析 / 096

5.3 基于状态监测的变电主设备短期检修决策方法 / 098

5.3.1 变压器异常状态的量化评估 / 098

5.3.2 断路器异常状态的量化评估 / 100

5.3.3 基于高斯核密度函数的变电主设备状态异常概率 / 104

5.3.4 变电主设备短期针对性维修决策 / 105

5.3.5 算例分析 / 106

5.4 考虑潜在运行风险的变电主设备检修顺序决策方法 / 115

5.4.1 变电主设备的可靠性模型 / 115

5.4.2 基于检修紧迫度的变电主设备检修顺序决策 / 118

5.4.3 变电主设备部件维修级别决策方法 / 125

5.4.4 算例分析 / 130

第6章 主动式电网营销技术 / 135

6.1 引言 / 135

- 6.2 基于大数据的主动式营销技术应用现状 / 136
 - 6.2.1 大数据在精准预测领域的应用 / 136
 - 6.2.2 大数据在精准服务领域的应用 / 138
- 6.3 基于节能型智能插座的用电大数据收集方案 / 138
 - 6.3.1 用电大数据的背景 / 138
 - 6.3.2 节能型智能插座简介 / 142
 - 6.3.3 分布式一致性算法 / 145
 - 6.3.4 用电大数据采集方案 / 149
- 6.4 基于大数据的主动营销技术应用案例 / 153
 - 6.4.1 上海:提速 20% 配网抢修更高效 / 153
 - 6.4.2 江苏:海量大数据精准预测用电量 / 154
 - 6.4.3 浙江:为客户“画像”供电服务更精准 / 154

参考文献 / 156

第 1 章 概 述

为了构建更为坚强的智能电网，提高电力系统的可靠性，需要改变传统电网“被动”的局面。本书主要从电力生产的规划、运行、保护、检修、营销这五大环节入手，研究各环节的主动式电网技术，让电网更“主动”、更坚强、更智能。

1.1 主动式配电网规划技术

未来电网规划将不再仅仅将满足负荷需求作为电网需求分析的唯一标准，即不仅仅基于最大负荷水平进行电网规划，而是需要考虑不同负荷水平、不同分布式电源出力下的概率性配电网规划。

主动式电网规划技术将从双态数据整合池、“三位一体”主动规划、配电网优化调度控制、源网荷协调消纳方式、阳光服务交互平台和异构通信网 6 个方面出发，全面提高配电网主动规划、主动控制、主动管理、主动服务和主动响应能力。同时，电网的建设和运行受外界环境的影响较大，受气象条件的影响尤为显著。气象条件是电网规划设计的主要依据，它的真实性和客观性直接影响着工程建设经济性与电网运行的安全性，并经受工程长期安全运行的考验。

因此，为降低和避免气象灾害对电力设施的破坏，电网公司先后出台了多项意见和措施，要求今后在电网规划和建设过程中，利用科技手段研究自然灾害规律，提升电网设施的抗灾害能力，保障电网的安全运行，使自然灾害造成的损失最小化，以期实现电网防灾减灾“预防为主，综合治理，损失最小，恢复最快”的基本要求。

1.2 主动式电网运行技术

在全球气候变化的大背景下，一些区域性的洪涝、高温、干旱、台风、雨雪冰冻等极端气候事件日益增多。联合国政府间气候变化委员会（IPCC）在 2012 年发布了题为《适应气候变化的极端事件和气象灾害风险管理》的报告。报告指出，在过去的 15 年中许多国家可能遭遇过极端天气事件，一些区域性的恶劣天气、极端气候事件的强度和发生频率有增强的趋势，特别是极端风灾和冰

灾。架空输电线路等输变电设备长期暴露于大气环境之中，易受气象灾害如雷暴、冰灾、风灾、地质灾害等的袭击而发生故障，电网能否安全可靠运行与外部气象环境有密切关系。

主动式电网运行技术将研究气象灾害作用下输电线路故障风险分析方法和预警模型，以构建精细化的输电线路气象风险分析和预警理论体系为目标，进一步深化气象导致输电线路故障的规律认识，提出有针对性的风险预警与防控方法。通过构建输电线路气象风险规律的描述方法，帮助电力系统实现差异化设计，完善可靠性评价模型，以及开展输电线路精细化运维管理。通过构建输电线路气象风险预测预警的模型和方法，帮助电力系统运行和调度部门提前感知线路运行风险，做好有针对性的降风险运行措施，从而防范大面积停电事故，提高电力系统安全运行水平。

1.3 主动式电网保护技术

在提升电力系统调控裕度和灵活性的同时，电力系统复杂程度大幅提升，安全问题也更加突出。显著增多的运行不确定性因素、远距离跨区输电的复杂外部气象环境、交直流故障耦合传播等影响因素均给现有的电力系统保护及安全控制带来新的挑战。因此，提升保护及安全稳定控制装置的适应性和预见性成为紧迫的要求。

主动式电网保护技术将从引发设备故障的原因、故障的发展趋势、后果差异等方面重新认识故障现象，提出研究基于输变电设备安全域的主动保护与控制方法，目标是通过获取外部气象环境及电网设备运行信息，主动感知影响电力设备本体的特征参数及其变化规律，构建输变电设备的安全域和动态安全裕度识别方法；根据设备安全域和设备运行参数偏离安全域的程度，预测故障发生或发展的趋势；在充分利用设备及电网冗余性的基础上，采取有效的控制措施阻断故障传播过程，控制故障后果，形成在线、动态的电气设备主动保护与控制体系，以适应复杂电网安全运行的需要。

1.4 主动式电网检修技术

变电站是电网的枢纽，是电网涉及行业门类较多且技术相对密集的地方。电力系统中各变电站的可靠运行决定了电网的可靠运行及电能质量。为了保证变电站处于健康良好的运行状态，变电设备，特别是变压器、断路器等主设备的检修工作成为供电企业日常繁重的工作之一。如何更为有效地提高变电设备的检修管

理水平和检修决策的科学性,是运行检修人员目前在日常工作中亟待解决的重点和难点。

主动式电网检修技术基于可靠性理论,对变电主设备及其部件的检修管理过程中何时检修和如何检修这两个关键问题进行了深入研究。针对已实施和未实施状态检修的情况,分别建立设备可靠性评估方法,判断设备是否需要检修;针对如何检修提出部件检修级别决策方法和检修顺序决策方法。老化、磨损、腐蚀、冲击等变电设备自身或者外界的因素,使得变电主设备的可靠性水平随着时间的推移而逐渐降低,发生故障在所难免。因此从现实层面而言,主动式电网检修技术能有效提高设备检修管理水平和检修决策的科学性,并在检修作业时保证电网的可靠性;从理论层面而言,基于可靠性理论对变电主设备检修决策方法的研究,可以丰富和完善可靠性及检修相关的理论和方法,将现实中的检修管理过程转化为实际有效的数学模型,进一步从理论上寻求最优的变电主设备检修方法与策略。

1.5 主动式电网营销技术

在未来的市场环境下,未来电网的营销不再是客户提供需求、供电企业来满足客户需求这种模式,而是通过大数据分析,掌握客户的行为习惯,主动为客户提供服务。可见,大数据将成为未来营销技术的基础。目前,电网公司已经实现了用电数据“全采集”。但是,电网公司能够采集到的用电数据仅限于电能表前,不能深入客户家庭。通俗地讲,客户和电网公司目前能够知道客户用了多少度电,而每一度电用在哪里却不得而知。也就是说,智能电表能够采集到的数据仅仅只是客户粗犷的用电总量,没有精细的分量数据,这导致电网公司与客户之间的用电数据的割裂、分离。于是,这种现状造成所采集数据的利用价值不高,可挖掘程度不深。

主动式电网营销技术研究开发节能型智能插座,并基于此建立用电精细数据库,可以了解客户用电详细情况,为其定制个性化的专属电价套餐,引导科学用电,锁住客户;可以为电网公司和政府提供分城市、分区域、分时段、分电器类型、分用电性质等;可以详细了解整个城市的用电分布情况,从技术上优化电网调度和运行,为政府能源战略决策提供技术支撑;为政府、国网,甚至广大电器厂商提供全方位详细数据——小到一台电器、一位客户,大到整个社会的详细用电情况;为电网公司提供分析与决策支撑,这些决策包括精准的调峰调频策略、精准的分布式新能源的调度策略、精准的负荷预测等。

第 2 章 主动式配电网规划技术

2.1 引言

分布式能源 (distribution energy resource, DER) 及新型用电负荷 (如电动汽车等) 的大量接入, 给配电网规划与运行带来了新的挑战。为此, 主动配电网 (active distribution network, ADN) 的概念应运而生。因为主动配电网属于一种新兴概念, 所以, 对其主要内涵还未有合理的解释, 相关技术范围也没有被明确划分出来。但按照国际权威的电力认证会议在召开期间给出的解释, 大部分研究人员认为: 主动配电网指的就是主动分配电网系统中存在的能源, 并对这些能源进行一定的管理控制。同传统配电网系统相比, 主动配电网更加灵活多样, 这使得其技术结构也相对复杂。主动配电网的出现和使用, 可以在一定程度上改变我国电网系统中的电流分布方式, 在电工管理和监控下, 以最标准的方式来分配电网中各个部位的电流量。从实际上来看, 主动配电网是通过利用具有高智能特性的电子控制器和灵活高度的通信网络, 为其在参与电力调节工作时提供一定的支撑, 确保其能够一直处于稳定运行状态, 从而达到优化电力供需的目的。

2.2 主动配电网规划的需求

配电系统是电力系统的重要组成部分, 是输电网和用户之间重要的中间环节。在传统配电网规划中, 配电网与用户稳定地扮演着“供”与“需”的关系。但近年来, 随着经济的不断发展和社会用电需求的增长, 电网最大负荷利用小时数不断上升, 尖峰负荷问题日益突出, 在此过程中, 配电网的运行负担也在急剧加重, 可控负荷等新型负荷的出现也对配电网的运行控制提出新的要求。此外, 大量分布式电源 (DG)、储能设备 (EES) 和可控负荷等分布式能源资源 (DER) 开始接入配网, 极大地增加了配电网的运行与控制的不确定性。

传统配电网在规划时没有考虑分布式电源接入配电网的影响, 而是基于电力潮流从变电站单向流向负荷点这一前提设计的, 只是针对某个负荷预测值采用最大容量裕度 (给定网络结构) 来应对最严重工况的运行条件 (即使最严重工况

为小概率事件), 从而在规划阶段就可以找到处理所有运行问题的最优解。因此, 为了保证网络的安全性和可靠性, 传统的配电网应对负载的不确定性通常依赖其大容量和灵活的网络结构, 但采用相对简单的运行模式和控制方法。然而随着配电网中 EDR 渗透率的快速升高, 配电网的规划方法和运行模式变得越来越复杂, 投资效益也大受影响, 促使配电网规划从被动规划向主动规划转变。

与传统规划不同, 主动规划是将配电网的规划建设和灵活管控相结合, 在满足电力需求和系统安全的前提下, 利用灵活管控技术来协调大规模间歇式能源出力与负荷用电的匹配度, 在不失可靠性的同时, 达到降低系统建设费用的效果, 实现整体的经济性, 确保电力企业和电力用户都能负担得起。因此, 主动规划是一种将主动管理引入规划过程的动态规划。

2.3 主动配电网规划与传统配电网规划

传统配电网的目的是在规划阶段解决运行问题, 如容量匹配, 而不考虑控制问题。而主动配电网的规划应该综合考虑运行问题和控制问题, 以实现最优的技术经济性。

传统配电网规划的主要任务是确定在规划期内何时、何地投建何种类型的输电线路及其回路数, 以满足规划周期内的区域电力负荷需求, 在确保达到线路载流能力、节点电压水平、供电可靠性等各类基本技术指标的前提下, 追求系统投资成本的最小化。为适应节能减排政策对电力系统发展提出的新要求, 近些年环境因素正被越来越多地考虑进配电网规划工作中, “成本最小化”已不再是决定规划方案优劣的唯一准则。与此对应的数学规划模型无论在目标函数还是约束条件下均得到一定程度的拓展。然而, 传统配电网属于标准的无源网络, 相关研究所采用的规划方法针对负荷预测结果采用必要的容量裕度即可应对所有可能的系统运行场景, 并方便地找到各类准则下的最优解, 因此传统配电网的规划研究相对简单。

主动配电网是一种分布式能源的资源优化配置方式, 涉及诸多因素。到目前为止, 我国乃至国际上对主动配电网规划的研究仍处于探索阶段。

2.4 主动配电网规划体系结构

主动配电网规划不再仅仅将满足负荷需求作为电网需求分析的唯一标准, 即不仅仅基于最大负荷水平进行电网规划, 而是需要考虑不同负荷水平、不同分布式电源出力下的概率性配电网规划。

本节根据主动配电网的特点，将主动配电网规划体系划分为现状分析、负荷预测、网荷协调规划等内容，如图 2-1 所示。

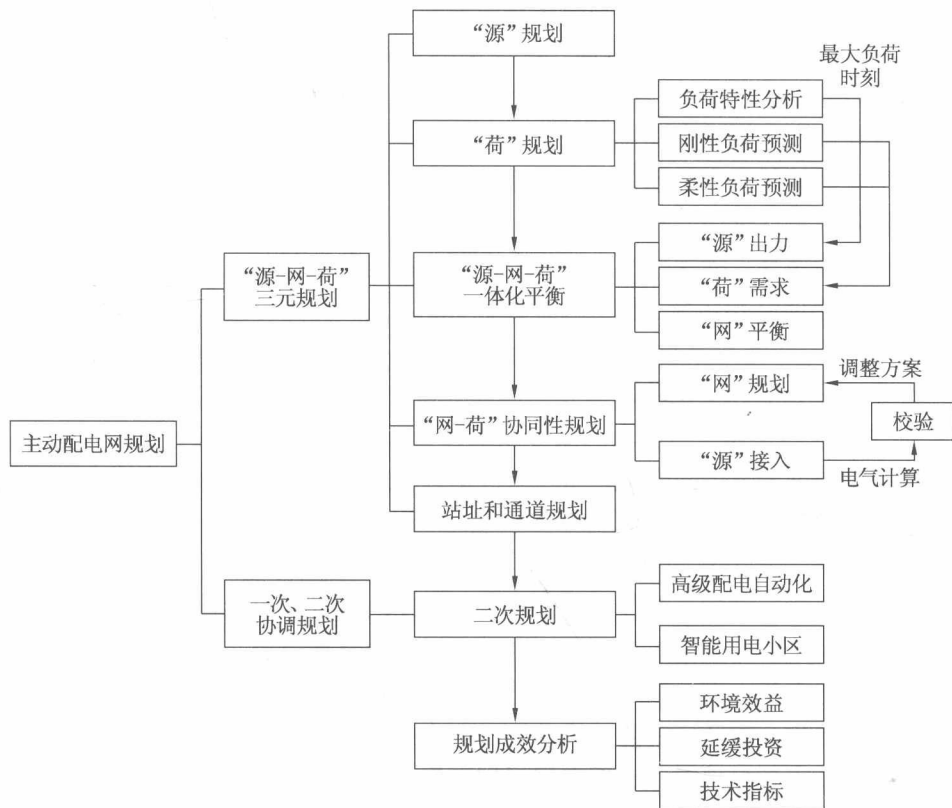


图 2-1 主动配电网规划体系结构图

2.5 主动配电网规划原则研究思路

主动配电网规划原则研究总体思路如图 2-2 所示，首先，从需求分析开始，对配电网规划、分布式电源、储能和电动汽车的需求进行调研；然后，针对主动配电网规划的模型和计算方法进行研究。在模型方面，首先对分布式电源和电动汽车的功率特性进行建模，针对主动配电网背景下的主动管理方式进行分析，建立主动配电网电源规划和网架规划的双层模型，实现分布式电源、电动汽车充电站和网架结构优化配置，采用智能算法求解。最后，将该方法应用于实际网络，验证方法的准确性和实用性，通过实践结果，实现电源和网架结构的优化配置，使得配电网性能得到大幅提升。