

DOI: 10.7667/PSPC201663

智能微网与柔性配网相关技术探讨

秦红霞¹, 王成山², 刘树¹, 刘云¹

(1. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085; 2. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 通过对现代配电网的发展趋势分析, 指出智能微电网技术与柔性配网技术是配网技术升级的有效手段。对智能微网的运行模式、主要应用技术、运行控制框架等关键技术进行概述, 分析该领域主要技术发展情况。对柔性配网概念进行介绍, 讨论了柔性配网中的关键电力电子设备构成、技术路线及其应用领域。着重分析了柔性配网技术对既有配网运行模式的改善, 探讨其应用价值。

关键词: 智能微网; 柔性配网; 软开合点

Discussion on the technology of intelligent micro-grid and flexible distribution system

QIN Hongxia¹, WANG Chengshan², LIU Shu¹, LIU Yun¹

(1. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Through the analysis of the development trend of modern distribution system, it is pointed out that the smart micro-grid technology and flexible distribution system technology are an effective means to upgrade the distribution system technology. The operation mode, main application technology and operation control framework of intelligent micro-grid are summarized, and the development of the main technology in this field is analyzed. The concept of flexible distribution system is introduced, and the flexible distribution system in key power electronic equipment, technical route and its application field are discussed. The flexible distribution system technology to improve the existing distribution system operation mode is analyzed, and its application value is discussed.

Key words: smart grid; flexible distribution system; soft open point

0 引言

配电网是电力系统面向客户的最后环节, 是保证电网供电质量、提高运行效率、提高供电可靠性的关键环节。

伴随着应用需求的不断提高, 传统的配电网逐步体现出一些不足之处: 在运行方面, 点多面广、数据量大、设备繁多, 拓扑关系复杂、线路改造频繁; 在维护方面, 设备故障率高、运行维护工作量大, 配电网图形模型维护异常困难。加之分布式能源及储能大量接入配网、电动汽车接入、微型电网接入与互动、需求侧管理 DSM(需求侧响应 DR+能效管理 EE+负荷管理 LM)等, 传统交流配电网在电能供应稳定性、高效性等方面面临巨大挑战, 配电网技术亟待升级^[1-3]。

依托先进互联网技术与电力电子技术, 建设智能微电网与柔性配电网, 是实现配电网技术改造,

实现产业升级的有效途径。

本文对智能微电网与柔性配电网的相关概念进行介绍, 对该领域目前相关技术发展情况进行总结, 并对其发展趋势进行展望。

1 智能微网

为整合分布式发电的优势, 削弱分布式发电对电网的冲击和负面影响, 美国 CERTS(The Consortium for Electric Reliability Technology Solutions)提出了一种能更好地发挥分布式发电潜能的组织形式-微电网(Micro-Grid)。CERTS 将微型电网定义为一组负荷和微能源的集合, 可以以一个单个系统的方式运行, 提供热和电, 其基本单元应包含微能源、储能装置、管理系统以及负荷。

微电网是可控的供能系统, 可平滑接入大电网和独立自治运行。微网中能源转换设备多样, 含有大量电力电子装置, 大量储能装置, 需要并网运行,

又要独立运行,与大电网相互作用,行为异常复杂。

1.1 微电网应用场景及应用模式

1) 并网运行模式

并网模式是指微电网与大电网并列运行,通过对微电网内分布式能源的合理调度,协调微电网和外网之间的关系,达到合理化利用微电网内部的资源设备,同时满足上层电网对微电网的某些辅助服务的需求目的。此状态下,对大电网来说,微电网可看做一个可控的电源或负荷,电网调度中心对微电网有一定的负荷或发电曲线调节需求。

2) 离网运行模式

离网运行模式是指微电网与大电网解裂运行,微电网依靠自身的主电源建立自身电压和频率。微电网能量管理系统通过对储能系统的充放电管理,调节分布式电源如燃料电池、柴油发电机的出力调度、负荷侧的控制等,确保微电网内发电与需求的实时功率平衡,防止储能电池的过充与过放,保证微电网的长期稳定运行。微网离网运行模式主要应用于偏远无电地区、海岛、关键军事区供电领域,也可作为后备电源,实现大电网停电后的短时供电。

3) 并离网切换过程

当外部电网发生故障或微网需要主动离网运行时,微网可以迅速断开并网开关与外部电网脱离,转入离网运行模式;当外部电网恢复正常或微网需要主动并网时,微网应重新并入外部电网。这一过程,称为微电网的并离网切换过程。微电网并离网切换过程是保证微网稳定运行和供电可靠性的关键。微电网并离网切换根据是否停电可划分为短时停电的有缝切换和不停电的无缝切换。

1.2 微电网主要应用技术

1) 微网优化规划技术

微电网优化规划是微电网规划设计阶段需要解决的首要问题,优化规划方案合理与否将直接决定微电网的安全运行和经济效益,不合理的配置方案会导致较高的供电成本和较差的性能表现,甚至无法体现出微电网系统自身所固有的优越性。因此,微电网优化规划技术是充分发挥微电网系统优越性的前提和关键。

微电网的优化规划技术主要包括系统网络结构优化设计以及分布式发电单元类型、容量、位置的选择与确定。根据微电网系统的负荷和可利用能源情况,综合考虑设备的运行特性、初期投资与运行维护费用、能源利用效率、环境友好程度及系统控制策略等因素,通过优化计算确定微电网的网络结构和分布式发电单元的配置信息,实现整个微电网系统的可靠性、安全性、经济性。如文献[4]提出

了一种适用于并网型微电网系统和独立型微电网系统的双层优化规划设计模型。

微电网优化规划需根据所在地的地理位置和条件、气象资料、电网资料、分布式电源工作特性、供电需求以及系统设计等数据来确定微电网各组成部分的类型和容量,以及相应运行策略等参数,以使微电网尽可能工作在理想的匹配状态下,达到经济性、可靠性和环保性等方面的优化。微电网优化规划体系涵盖的内容相当丰富,涉及可再生资源与负荷模型、分布式电源及系统模型、优化规划方法、运行策略、求解算法、规划方案稳定性校核等诸多方面。

2) 微电网的协调控制技术

协调控制是微电网安全稳定运行的基础和保障,是构建微电网的重要技术环节,同时也是协调网内软硬件系统实现既定控制目标的关键支撑技术^[5]。与此同时,微电网本身具有网架结构灵活、电源类型多样、控制方式复杂、运行模式多的特点,其运行控制更具难度。具体体现为微电网中分布式电源种类丰富,既含有传统的电机等旋转设备,又包含新型的光伏蓄电池等直流型设备;既含有燃气轮机动态响应较慢的原动装置,也含有快速动作的电力电子装置。外部环境的光照、温度等变量甚至跨越了秒级、分钟级、小时级等不同的时间尺度,既包括并网、离网运行稳态运行过程,也包括并离网转换、短路故障等暂态运行过程,因此系统的运行控制需要综合考虑不同设备、不同控制目标的时间响应差异性和相关性,针对系统运行工况,合理制定运行控制策略。

3) 微电网的能量管理技术

微电网能量管理的作用是根据微电网运行监控系统存储的包括各种微电源出力、负荷功率、气象资料在内的各种历史数据以及未来一段时间的气象数据和负荷信息,进行风电、光伏出力预测和负荷预测,并根据预测结果和优化控制目标编制风机、光伏、负荷的投切计划、储能系统的充放电计划以及各种设备的检修计划,从而实现微电网实时功率分配和运行优化,并通过系统分析提高微电网运行的安全性、可靠性和经济性。能量管理可以依据市场信息、负荷需求、分布式电源或储能的运行约束、可再生资源状况等条件,通过对分布式电源、储能单元、负荷等的优化调度或协调控制实现系统的经济、环保、可靠运行。

4) 直流及交直流混合微电网构建技术

直流微电网的特性是系统中的分布式电源、储能装置、负荷等均连接至直流母线,直流网络再通

过电力电子逆变装置连接至外部交流电网的结构形式^[6]。直流微电网通过电力电子变换装置可以向不同电压等级的交流、直流负载提供电能, 分布式电源和负荷的波动可由储能装置在直流侧调节。

目前交流微电网仍然是微电网的主要形式。在交流微电网中, 分布式电源、储能装置等均通过电力电子装置连接至交流母线, 通过对 PCC 处开关的控制, 可实现微电网并网运行与孤岛运行的切换。

交直流混合微电网结构如图 1 所示。在这类微电网中既含有交流母线又含有直流母线, 既可以直接向交流负荷供电又可以直流向直流负荷供电。

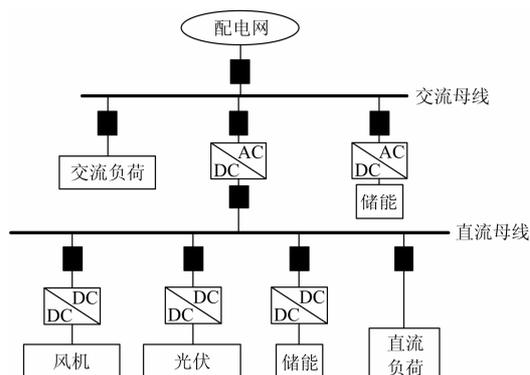


图 1 典型交直流混合微电网结构

Fig. 1 Hybrid AC/DC micro-grid structure

5) 微电网群的运行管理技术

微电网群是微电网、多微电网系统发展到一定阶段形成的产物。多个微电网通过微电网公共连接点接入电网。各微电网之间可以实现一定程度的能量互济与合作运营。微电网群结构如图 2 所示。

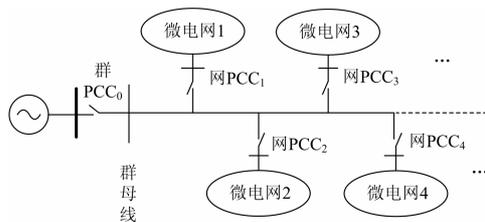


图 2 微电网群结构图

Fig. 2 Structure of micro-grid group

微电网群控制系统按功能可划分为三层。

第一层是单元层, 包括风力、光伏、储能和负荷测控终端。风力、光伏电源/储能的测控终端完成分布式电源/储能对频率和电压的一次调节; 负荷测控终端根据电网的要求, 按优先级和容量匹配原则切除负荷, 同时监控负荷功率变化及开断情况, 保证系统安全运行。

第二层是微电网层, 包括微电网控制器和微电网能量管理系统。微电网能量管理系统在风力、光

伏、负荷预测的基础上, 完成微电网内分布式电源/储能的发电计划制定, 并将发电计划下发到微电网控制器。微电网控制器负责执行微电网能量管理系统下达的发电计划, 实现离并网平滑切换、分布式电源控制、储能控制、分级负荷控制、微电网的电压、频率控制等功能。

第三层是微网群层, 包括微网群控制器和微网群能量管理系统。微网群能量管理系统在群内风力、光伏、负荷预测的基础上, 完成微网群内的微电网发电计划制定, 并将计划下发到微网群控制器。微网群控制器负责执行微网群能量管理系统下达的发电计划, 按群目标制定控制方法, 实现微网群的离并网切换, 微电网间联络线功率控制。为了维持微网群内电压频率稳定, 在单元层、网控层及群控层分层实施电压、频率调整, 各层采用不同的时间尺度, 保证功率平衡并维持电压、频率在允许的范围内。

1.3 微电网运行控制架构

微电网系统中含有大量不稳定的分布式电源, 系统的高效、可靠运行控制难度较高。与传统的变电站监控相比, 微电网监控系统除了常规的监视和控制外, 微电网系统架构需要考虑整个微电网的稳定性与经济性。

在控制方面, 微电网内光伏、风机等分布式电源出力具有随机性和波动性, 而且使用大量电力电子装置的逆变电源不具有大电网的电源自同步性和惯性, 微电网中负荷波动对系统电压频率影响更大、变化更快, 而大电网中负荷波动相对冲击小。因此整个微电网系统架构需要考虑到微电网的快速稳定控制。

在监视方面, 系统信息量大。由于微电网中使用储能, 储能管理单元 BMS 需要大量上传电池信息(单体电池电压、端电压、充放电电流、SOC、模块箱温度、蓄电池相关充放电控制参数、告警信息等必要信息)至监控系统。根据目前项目实施的结果来看, 储能管理单元 BMS 通信信息量大, 有庞大的信息点进入监控数据库处理。

在保护方面, 独立供电系统相对于大电网而言, 缺乏大容量的电源作为系统频率电压的有力支撑, 因此主网任一点发生故障, 都可能引起全网系统电压下降, 如果不能及时切除故障, 将可能扩大故障范围, 引起连锁反应, 甚至造成主网电压崩溃的严重后果。

因此微电网系统架构设计既需要处理大容量的信息接入, 又要保证紧急情况控制和保护的快速性。

基于以上原因, 国内微电网项目的运行控制构架中一些厂家和科研院所提出了监视网和控制网分

离的微电网三层两网的自动化与保护系统架构。整个系统架构基于 IEC61850 的通讯体系，三层是指：优化控制与监视层、协调控制与保护层、就地控制与保护层。两网是指：监视采用 MMS 网，中央控制与区域保护采用 GOOSE+SV 网。两者分开组网，既保证控制信息的快速性又保证监视信息的全面性。

优化控制与监视层具备传统 SCADA 以及系统经济运行功能，根据系统的预测与运行信息，做出系统决策。优化控制与监视层通过监视网 IEC61850 MMS 与各层设备进行数据交互，保证监控数据的完整性。

协调控制与保护层进行微电网的区域保护以及整个微电网的快速稳定控制。协调控制与保护层的中央控制器通过控制网 IEC61850 GOOSE 与就地控制设备交互必要的可定制 GOOSE 信息，减少冗余信息在控制网的传输，保证数据获取和控制的快速性。协调控制与保护层的微电网区域保护装置通过 SV 与就地保护装置交互，获取全网的电压电流及状态信息，通过 GOOSE 协议将命令下发到终端，实现微电网的快速保护。

就地控制与保护层实现就地微源的测量与控制，以及微电网的后备保护。

2 柔性配电网

柔性配电网是使用先进电力电子技术，对传统配电网进行升级改造的产物。利用电力电子装置控制对象多样、控制速度快、调节能力强的特点，改变原有配电网系统的潮流与无功分布状态等运行参数，有效的提升配电网系统的可靠性、可控性和运行潜力。

2.1 柔性配电网关键电力电子设备

随着电力电子技术的迅猛发展，电力电子装备技术日趋成熟，并在工业中大量应用。基于配电网运行的基本要求，三种电力电子装备可以在配电网中能够起到显著地作用，具有极大的应用前景。

1) ACDC(ACAC)换流器

ACDC 或 ACAC 换流器指通过电力电子变换装置，实现交流到直流或交流到交流之间能量转化的设备。通常 ACAC 换流器由两种背靠背连接 ACDC 换流器拼接构成，目前主流采用的 ACDC 换流器为 VSC 形式(电压源型换流器)。通过 ACDC 换流器，可实现多个配电馈线之间的连接与协调控制。

ACDC 换流器具有多种拓扑结构可供选择，包括两电平结构、二极管钳位式三电平结构、模块化多电平 MMC 结构(Modular Multi-level Converter)等多种^[7]。鉴于中压配电网系统的电压水平，模块化

多电平 MMC 结构是应用较为恰当的一种拓扑结构，其主电路拓扑如图 3 所示，通过子模块的投切状态组合形成所需的输出电压，具有结构简单、器件要求低等特点。综合考虑经济成本，技术难度及系统特性等，柔性直流配电工程可采用 MMC 与 VSC 共存的混合式多端换流器的拓扑结构^[8]。

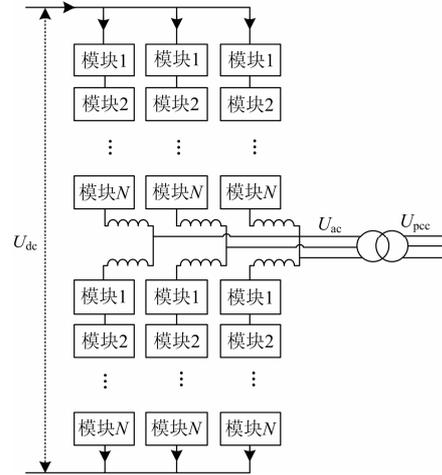


图 3 MMC 拓扑

Fig. 3 MMC topology

2) DCDC 换流器

DCDC 换流器指通过电力电子变换装置，实现不同电压等级间能量传递的设备。

DCDC 换流器可分为输入输出不隔离型与隔离型两种。前者以 BUCK、BOOST 等变换电路为主，结构简单、控制稳定，但限于电压变比、功率等级等因素，仅适用于低压配电网，无法在中压配电网中使用。后者主要指电力电子变压器，其基本电路是，直流电压经逆变电路斩波后成为高频方波，再经高频变压器转换为电压较低的高频方波，最后由整流电路转换符合电压要求的直流能量。依据容量与电压的要求，电力电子变压器原副边可进行串并联的独立设计。此外，直流变压器还有推挽、正激、半桥等多种新式。电力电子变压器可实现输入、输出间的电气隔离，并能实现高变比变换，在中压配电网中有较大的应用潜力。

3) 直流断路器

相比于传统交流配电网，柔性配电网中的电力电子装置构建了直流电网，分布式电源与直流负荷直接接入直流电网，带来了应用的便利性和效率的提升。但是如何解决直流故障分断与故障隔离，又带来的新的问题。

直流断路器分为机械式、固态式和混合式三种。机械式直流断路器可以关断非常大的电流，并具有

成本低、损耗小的优点,但其开断速度慢,不能满足电力电子设备快速保护的要求^[9-10]。固态直流断路器开断速度迅速,但其开关损耗较高,且价格昂贵^[11]。为克服两者的缺点,通过将机械式直流断路器和固态直流断路器集成在一个装置上,从而形成混合式断路器。混合式直流断路器结合了机械开关良好的静态特性与电力电子器件良好的动态性能,用快速机械开关来导通正常运行电流,用固态电力电子器件来分断短路电流,具有通态损耗小、开断时间短、无需专用冷却设备等优点,是目前中高压直流断路器研发的新方向,有着广阔的应用前景^[12]。

2.2 柔性配电网技术应用

在常规交流配电网中,以断路器、隔离开关等元件实现配网馈线间的联络,通过切换开关元件的通断状态改变网络拓扑,进而调整潮流的分布。这种非0即1的调整方式,拓扑改变后系统的潮流分配仍然为自然分配,调整灵活度有限。

采用电力电子装置作为馈线联络开关或称之为软开关点(Soft Open Point, SOP),构建柔性配电网后,可以精准而快速的调整馈线间的功率流动,从而有效控制网络潮流分布,实现多种系统控制目标^[13]。

1) 提升分布式电源接入能力

分布式新能源,尤其是分布式光伏越来越多的应用到实践当中,代表着新能源应用的未来。很多研究表明,分布式光伏发电装置接入配电网后,将使得接入点及相关局部线路的电压升高,产生配电网中局部电压越限的问题。其电压提升幅度与线路参数、用户负荷大小、光伏发电出力及其接入位置密切相关。由于这些约束条件变化频繁,对此问题的治理变得很复杂,由此将极大限制分布式新能源渗透率的提升。这一问题的本质是新能源与就地负荷的不匹配造成的,通过加入 SOP 电力电子接口装置,可有效调整各馈线间及接入点分段母线间的潮流分布,进而避免电压越限问题出现,提升分布式电源的渗透率,为分布式光伏的广泛应用带来可能。

图4展示的相关仿真结果,证明了如上的论述,通过加装 SOP 装置,可将范例的配网分布式能源接入渗透率从27%提升至76%。

2) 提升分布式电源接入能力

智能配电网负荷类型丰富,时间、空间分布呈现动态不平衡特性,不同馈线间的潮流可能出现极大的差异。如图5所示系统,两段馈线A/B间,负荷差异达到50%以上,如无相关调节措施,差异性将始终存在,在总体中压系统配电容量充足的情况下,造成局部馈线过载,被迫进行设备升级改造,或过载运行,带来运行风险。

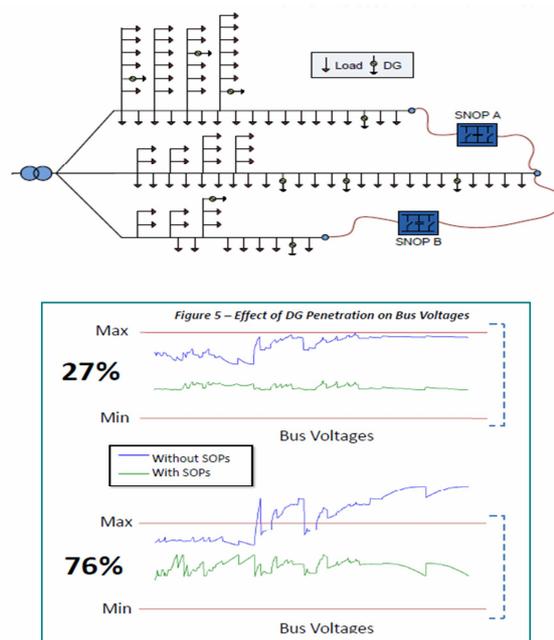


图4 采用 SOP 装置仿真结果

Fig. 4 Simulation result by using SOP device

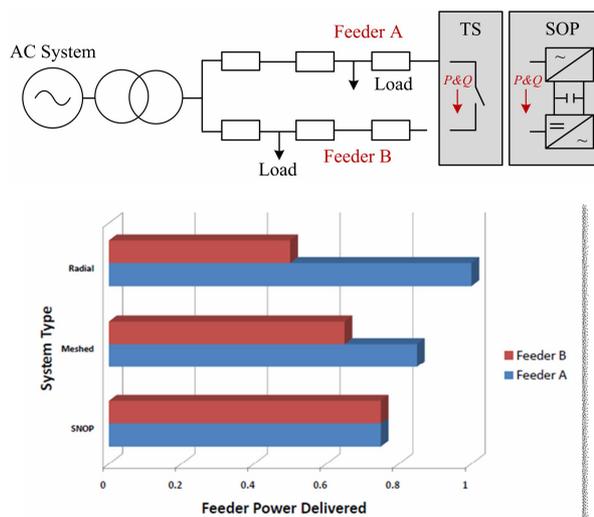


图5 利用 SOP 平衡线间负荷仿真结果

Fig. 5 Simulation result by using SOP to balance load

图5比较了馈线间无开关、有传统开关并闭合、接入 SOP 开关三种情况下两条馈线的负荷情况。通过传统母联开关的方式,可以一定程度上解决馈线过载问题,但只能部分解决问题,馈线间的不平衡依然存在。通过加装电力电子接口 SOP 装置,可以完全平衡馈线间的负荷,将运行过载风险降到最低,将配电设备利用率提到最高。

3) 降低配网运行损耗

现代电网的负荷越来越复杂,动态波动性越来越强,同时大量分布式新能源的接入,造成潮流变

换越来越复杂，分布不均匀性难以预测与控制，网损问题会日益突出。通过在关键节点加装 SOP 装置，以潮流分布优化、减小流动路径为目标，可以动态调节馈线间的潮流分布，极大降低馈线上的损耗，即使考虑 SOP 的自身损耗，其综合效率，在很多工况下仍然是具有应用价值的。

图 6 展示了一个典型配网，负荷中包含分布式电源发电，通过 SOP 装置，将放射状电网改变为多重连接的环网，各段馈线的潮流均可控，在很多工况下系统总体损耗有明显降低。表 1 给出了一个典型运行工况下的系统整体损耗，加装 SOP 后，整体损耗明显降低。

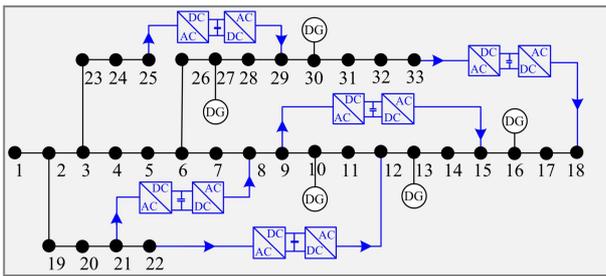


图 6 配网仿真模型

Fig. 6 Simulation model of distribution system

表 1 采用 SOP 后配网损耗

Table 1 Loss of using SOP

名称	初始状态	网络重构	SOP 优化
外部/kVA	3917.4 +j2405.4	3854.4 +j2405.4	3792.4 -j253.2
SOP/kVA	/	/	1891.5+j2073.0
损耗/kW	202.7	139.4	77.4

4) 紧急情况供电

配电网工况复杂，故障发生频繁。通过常规联络开关，在故障清除后，可以重构网络，恢复供电。但是由于机械式开关的开合时间，必然存在短时停电的情况。

通过加装 SOP 装置，可以在配网部分馈线发生故障后，更为快速的恢复馈线供电，在配合快速开关(如电子开关)的情况下，甚至可以实现不间断供电。当然这项功能的实现，需要的设备容量与成本较高，但对于部分核心关键负荷，是具有实际应用意义的。

5) 配网供电电能质量的提升

除了有功潮流调度能力，电力电子接口 SOP 装置具有诸多附加功能，如通过无功控制改善系统中的无功容量缺口，提升电网的稳态电压水平与暂态电压稳定能力等。

3 结语

本文通过对当前配网发电、输电、用电情况的分析，指出配网的设计、调度与应用面临新的挑战，通过建设智能微网与柔性配网，可有效的解决配网面临的问题。本文完整的介绍了智能微网的相关关键技术，并对其应用场景和应用模式进行了讨论。对柔性配网的构成基础-电力电子变流器设备进行了介绍，分析了不同设备的应用特点。依据柔性配电网的特点与优势，就其对传统配电网的功能提升进行了重点讨论。相关仿真及计算结果表明，柔性配电技术将极大的提升传统配电系统的供电可靠性、电能质量、分布式能源接入能力、电网资产利用率等关键指标。综上分析，智能微网与柔性配电技术将极大地提升配网系统的技术水平，有助于配网领域实现产业升级。

参考文献

[1] 王成山, 王守相, 郭力. 我国智能配电技术展望[J]. 南方电网技术, 2010, 4(1): 18-22.
WANG Chengshan, WANG Shouxiang, GUO Li. Prospect over the techniques of smart distribution network in China[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(1): 18-22.

[2] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14, 23.
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14, 23.

[3] 于亚男, 金阳忻, 江全元, 等. 基于 RT-LAB 的柔性直流配电网建模与仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 125-130.
YU Yanan, JIN Yangxin, JIANG Quanyuan, et al. RT-LAB based modeling and simulation analysis of flexible DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 125-130.

[4] 刘振国, 胡亚平, 陈炯聪, 等. 基于双层优化的微电网系统规划设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 124-133.
LIU Zhenguo, HU Yaping, CHEN Jiongcong, et al. A planning and design method for micro-grid based on two-stage optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 124-133.

[5] 刘梦璇, 郭力, 王成山, 等. 风光柴储孤立微电网系统协调运行控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 21-24.

- LIU Mengxuan, GUO Li, WANG Chengshan, et al. A coordinated operating control strategy for hybrid isolated micro-grid including wind power, photovoltaic system, diesel generator, and battery storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 21-24.
- [6] 刘梦璇, 郭力, 王成山, 等. 基于多目标的独立微电网优化设计方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 34-39.
- LIU Mengxuan, GUO Li, WANG Chengshan, et al. An optimal design method of multi-objective based island microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 34-39.
- [7] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems: an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602
- [8] 孙刚, 时伯年, 赵宇明, 等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 127-133.
- SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-133.
- [9] FRANCK C M. HVDC circuit breakers: a review identifying future research needs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 998-1007.
- [10] BACHMANN B, MAUTHE G, RUOSS E, et al. Development of a 500 kV air-blast HVDC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, PAS-104(9): 2460-2466.
- [11] MEYER C, SCHRODER S, DE DONCKER R W. Solid-state circuit breakers and current limiters for medium-voltage system shaving distributed power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1333-1340.
- [12] MEYER J M, RUFER A. A DC hybrid circuit breaker with ultra-fast contact opening and integrated gate-commutated thyristors (IGCTs)[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 646-651.
- [13] 王成山, 孙充勃, 李鹏, 等. 基于 SNOP 的配电网运行优化及分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 82-86.
- WANG Chengshan, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SNOP-based operation optimization and analysis of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 82-86.

收稿日期: 2016-06-20

作者简介:

秦红霞(1971-), 女, 高级工程师, 主要从事电力系统自动化, 继电保护、安全稳定控制等领域的研究工作; E-mail: qinhx@sf-auto.com

王成山(1962-), 男, 教授, 主要从事电力系统安全性分析、城市电力系统规划、分布式发电系统等领域的研究工作;

刘树(1981-), 男, 高级工程师, 主要从事电力电子技术、柔性输配电技术、微网技术等领域的研究工作。

(编辑 葛艳娜)