

[配电网]

综合提升配电网可靠性和韧性的技术措施

文/王 照

施耐德电气(中国)有限公司

在国家日益关注安全可靠供电的背景下,提升供电可靠性的同时需要综合考虑韧性的提升。“十三五”期间,我国的供电可靠性有了较大的进步,预安排停电的占比逐年降低,2021年故障停电成为影响供电可靠性的主要矛盾。基于故障停电和预安排停电的数据,分析了综合提升供电可靠性和韧性的技术路径,以及各种技术对可靠性和韧性的提升效果。

配电网是连接输电网、分布式电源和负荷的关键环节,配电网供电可靠性对于未来新型电力系统的安全可靠运行至关重要。为了提升配电网可靠性,本文分析了当前供电可靠性的变化趋势,针对可靠性和韧性的不同影响因素,从设备质量和环境耐受、设备数字化、故障转供能力、不停电作业、微电网及配电网承载力分析软件等方面对提升可靠性和韧性的措施进行了综合分析。

配电网供电可靠性变化趋势

随着全国范围的配电网建设改造行动的推进,网架结构优化和配电自动化技术的推广,我国的供电可靠性指标进步明显,如图1所示,主要是农村配电网可靠性指标提升较大。然而,我国各区域的供电可靠性差距较大,广州、深圳等城市的供电可靠性已经超过发达国家,但大部分城市特别是农村的供电可靠性依然落后于发达国家。

供电可靠性问题在早期的主要原因是预安排停电,如图2所示,一直到“十三五”期间,在整个停电时间预安排停电占比依然超过故障停电。得益于电网企业持续推动不停电作业等技术,2021年,全年预安排停电的占比首次低于50%,故障停电成

为了影响供电可靠性的主要矛盾。

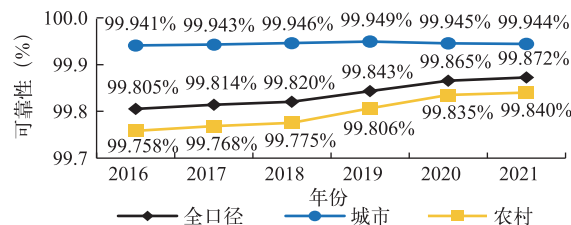


图1 2016—2021年全国供电可靠性变化情况

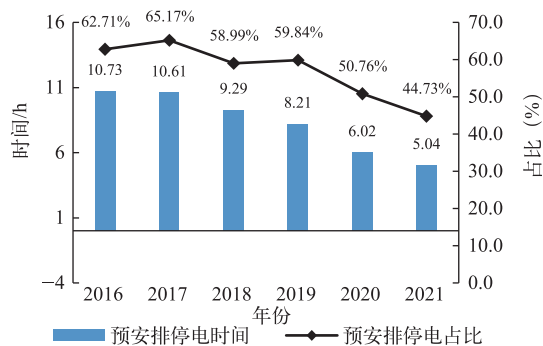


图2 预安排停电的时间以及占比

计及配电网韧性的供电可靠性

我国和发达国家采用的供电可靠性指标体系基本一致。国外在统计可靠性指标时将重大事件日

的停电时间剔除（不可抗力），而我国在早期没有区别对待此类重大事件（限电）。重大事件日（TMED）的目的是让重大事件与日常运行分开研究，并在此过程中更好地揭示日常运行中的趋势，而这些趋势会被重大事件的巨大统计效应所掩盖。

配电网日常运行的停电可以通过可靠性来描述，可靠性主要关注局部故障等概率大、事故影响较小的事件；而重大事件的停电可以通过韧性来描述，韧性主要关注自然灾害等概率小、影响大的事件，例如台风、洪水等。随着新标准的制定，我国的供电可靠性评价体系已将重大事件日计入统计分析。其中，整体供电可靠性统计口径依然包含了重大事件日，例如2021年，全国供电系统用户平均停电时间受重大事件日影响1.01 h/户，占用户平均停电时间的8.97%，占故障平均停电时间的16.24%。韧性和可靠性的区别见表1。

表 1 韧性和可靠性的区别

	韧性	可靠性
统计时间	重大事件期间	以年为单位
事故频率	小概率事件	概率较大
事故时间尺度	小时，天	毫秒，分钟
事故范围	范围较大，包含区域内多个设备和负荷	范围较小，主要考虑单重故障
恢复供电方式	分布式电源，故障修复	负荷转供，故障修复

无论是日常运行中的停电，还是重大事件的停电，都会影响用户的用电连续性，因此在研究提升供电可靠性的措施时，建议综合研究日常运行和重大事件，以整体提升计及配电网韧性的供电可靠性。

提升配电网可靠性和韧性的措施

1. 综合提升供电可靠性和韧性的技术

2021年的统计数据显示，全国故障停电占前五的原因从高到低依次为设备老化（15%）、大风大雨（15%）、自然灾害（10%）、用户影响（10%）和异物短路（8%）。其中，设备老化引起的故障停电，既可以通过改善设备质量减少停电频率，也可以通过状态检修提前发现设备缺陷，从而避免故障发生或缩小故障影响；部分大风大雨和异物短路引起的故障停电，可以通过负荷转供来减少停电范围并缩短供电恢复时间；自然灾害属于不可抗力，是配电网韧性的范畴，可以通过分布式电源

保障部分关键负荷的供电。

2021年的统计数据显示，预安排停电的原因主要是电网工程（45%）和计划检修（41%），两者加起来占比为86%。其中，部分电网工程停电和计划检修停电可以通过不停电作业来减少停电范围和时间；计划检修停电还可以通过状态检修延长检修间隔，从而减少计划检修停电频率和时间。

综合起来，提升包括韧性在内的供电可靠性的措施包括：强化设备质量和环境耐受，减少设备停电频率和时间；合理利用设备数字化，减少检修停电时间；提升故障转供能力，减少停电范围，缩短故障停电时间；深化不停电作业，缩小负荷损失的范围和时间；应用微电网和需求侧响应，提高系统抵御能力；开发配电网承载力分析软件，提高系统分析能力。

2. 强化设备质量和环境耐受，减少设备停电

故障停电时间有约16.5%是由设备故障引起的。设备故障有内在的因素，也有外在的因素。设备本身的质量问题要从设计、工艺、质量控制等多方面加以解决，例如设备预留足够的绝缘间距，设计合理的泄压通道和五防联闭锁，加强元器件的抽检等。同时，要关注设备的应用环境，提升设备在非常规环境的耐受能力，包括高海拔、高湿及高盐雾等。以高湿环境的应用为例，设备发生凝露会加快设备的锈蚀。为了减少锈蚀，传统的方法可以采用加热板减少温度差，也可以采用除湿器降低相对湿度，这两种方式都可以减少凝露发生，进而减少锈蚀的风险。采用复合材料设计和制造操作结构，可很好地耐受恶劣环境，从根本上解决锈蚀问题。试验表明复合材料在盐雾、高湿度及水解试验后仍能维持较高的寿命水平，且无锈蚀情况出现。

3. 利用设备数字化，减少检修停电时间

设备在配电网中长期运行，受外在因素（如安装问题、外力破坏、污秽及凝露等）或内在因素（如绝缘老化、漏气及运检缺陷等）的影响，可能出现缺陷或故障。配电网开关设备的主要故障包括机械故障、绝缘故障、温升故障及其他故障。设备缺陷在发展成故障之前一般有前兆，这些前兆可以通过安装在各部位的传感器（如电流、温度、局部放电、位移及压力等传感器）感知到。

基于配电网设备的设计数据、试验数据、运行

数据和专家经验等，形成配电网设备的模型算法。配电网设备的传感器数据通过模型算法后得出配电网设备的状态，包括预警和告警。状态诊断模块给出缺陷类型的初步判断，并且为运维人员提供运维建议。通过配电网设备的状态诊断，提前识别出设备缺陷，可以在合适的时间安排检修，也可以避免缺陷发展造成停电故障，如图3所示。

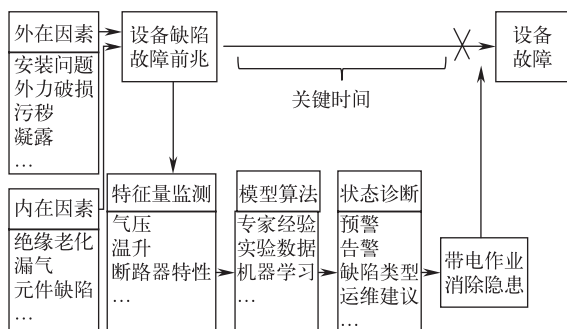


图3 设备数字化预防设备故障示意图

4. 提升故障转供能力，缩短故障停电时间

配电网故障发生后，变电站出口断路器保护或带保护功能的馈线终端设备（FTU）/开闭锁终端设备（DTU）会识别故障并跳闸。通过加装分段开关或者采用断路器替代负荷开关，可以缩小保护跳闸引起的停电范围。对于单环网、双环网及多电源等网架结构，配合FTU/DTU的分布式馈线自动化功能，可以进一步隔离故障区段，并自动恢复非故障区段的供电，大幅度减少非故障区段的停电时间。对于花瓣型闭环运行的网架结构，配合差动保护，可以不需要转供过程，非故障区段的停电时间更短。不同故障恢复过程对比如图4所示。

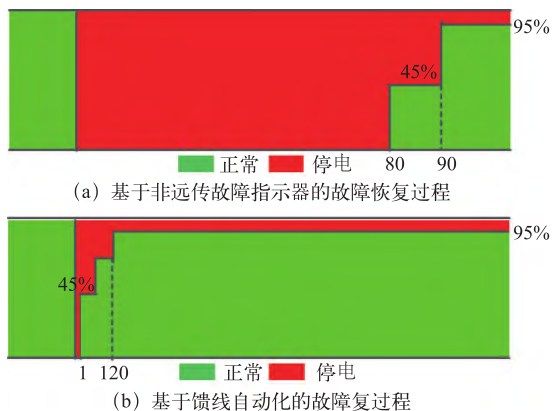


图4 不同故障恢复过程对比

智能分布式馈线自动化通过通信在DTU之间传

递信息，目前主流的通信方式有光纤和4G等，随着5G技术的成熟，采用5G通信的分布式馈线自动化已经试点应用。5G技术的高速率、低延时及广覆盖等特点很好地解决了可靠通信和灵活部署的问题，对于光纤通信是有益的补充。对于5G和光纤混合组网、冗余配置等方面的研究也在进行。

随着配电网规模扩大以及全社会供用电安全意识提升，小电流接地故障处理原则由“带故障运行”改为“快速就近隔离故障”。小电流接地故障的处理可以避免其发展成两相接地等更严重故障，也可以减少林草火灾和人身触电的风险。目前，基于特征量的传统继电保护在多点接地、高阻接地及间歇性接地等情况下的保护效果仍有待提高。基于机器学习等大数据分析新方法的新选线原理显现了解决复杂接地问题的潜力。

5. 深化不停电作业，减少负荷损失的范围

在预安排停电中，绝大部分可以通过不停电作业的方式减少负荷损失。常见的不停电作业包括低压台区或者中压侧接入应急电源（发电车、电池车等），中压线路通过柔性电缆旁路、带电作业机器人及不间断电源等。为缩短应急电源的接入时间，行业内逐步开始采用快速接口的方式，在5 min内可以完成快速连接。另外，快速接口在未插合状态下允许柜内有凝露；在插合状态下不受环境湿度的影响。目前，国家电网公司已经制定了节点PT柜的标准化方案并在部分项目上进行应用。然而，快速接口的价格依然较贵，如果要大范围应用，要考虑合理布点的问题。

6. 应用微电网，提高系统抵御和恢复能力

极端自然灾害等重大事件发生时，因影响范围较大，很难获得其他方向的电源。而微电网含有分布式电源、储能以及可控的负荷，在失去大电网支撑的情况下具备持续供电的能力。如图5所示，实线表示传统配电网的恢复供电过程，虚线表示微电网的恢复供电过程。微电网在系统正常运行时，可以承担部分的负荷；当重大事件发生时，微电网与配电网断开，具备孤岛能力的微电网通过快速切负荷和储能，即使在事件后降级状态也能保留对部分关键负荷的连续性供电；随着分布式发电，包括本地柴油发电机组、光伏发电等电源逐步起动，微电网以及分布式电源逐步增加对关键负荷的供电；当

配电网恢复后，微电网与配电网共同承担区域的供电。在整个重大事件的恢复供电过程中，微电网在事故中及事故后，不但能够保持关键负荷的连续供

电，而且供电恢复过程也更快，对于事故区域的配电网韧性有较大的提升。

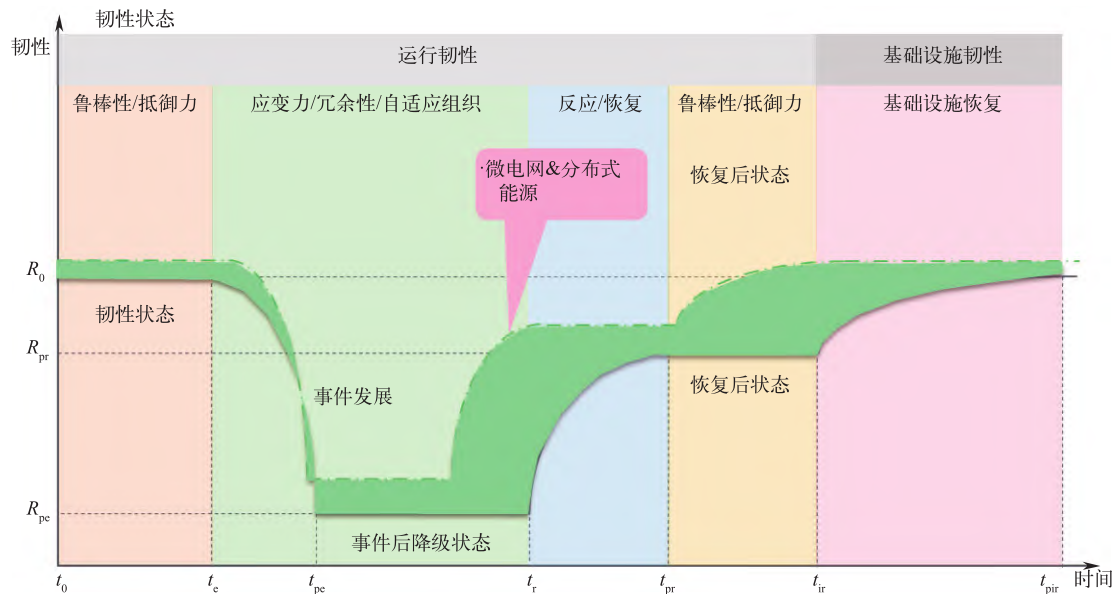


图5 微电网对系统韧性的作用

考虑到重大事件的时间一般持续几十分钟到数小时，分布式发电中的光伏发电、风电发电受光照和天气影响将有明显的波动，因此微电网的控制需要考虑负荷的需求侧响应。若分布式电源无法满足负荷，则对孤岛内具备需求侧响应能力的负荷发出响应邀约，降低功率，若依然无法满足功率平衡，则切除重要性较低的负荷。

7. 开发配电网承载力分析软件，提高分析能力

在“双碳”目标下，分布式电源和电动汽车负荷的比例快速提升。然而，新能源发电和电动汽车充电具有波动性、不确定性的特点，对配电网的容量裕度、可靠性及电能质量都会产生影响。现有的配电网主要是按照传统，从上级电网向负荷侧单向供电的模式规划。因此，在新的分布式电源和电动汽车充电负荷接入配电网前，需要进行配电网的承载力分析，具体约束指标见表2。

配电网承载力是指在设备持续不过载和短路电流、电压偏差及谐波不超标条件下，配电网接纳电源、负荷的最大容量。当新增的分布式电源和电动汽车接入配电网时，需要计算系统的反向负载率、热稳定、短路电流、电压偏差和不平衡度，以及谐波，最终确定是否满足承载力评估的要求。同

时，配电网承载力分析还可以定量计算评估区域内可新增分布式电源容量，优化合理布局新增分布式电源。

表 2 配电网承载力分析的约束指标

电压	系统最大电压不平衡度
	系统最大电压偏差
热稳定	最小功率因数
	变压器最大负载率
保护	电缆、线路、母线最大负载率
	故障（短路）电流
电能质量	反向（负载）潮流
	谐波幅值
	总谐波含量

结束语

本文基于最近6年的供电可靠性变化趋势，提出了需要计及配电网韧性综合提升配电网可靠性的技术措施。针对停电的各种影响因素，本文综合阐述了减少故障停电和预安排停电的方法，以提升配电网在日常运行和重大事件情况下的综合可靠性。本文所阐述的方法已经在局部试点应用。未来，根据配电网的可靠性和韧性的需求，建议合理安排各技术措施的推广应用。EA

（收稿日期：2023-08-30）