

智能配电网自愈功能与评价指标

李天友^{1,2}, 徐丙垠^{3,4}

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 福建电力公司, 福建 福州 350003; 3. 山东理工大学, 山东 淄博 255012;
4. 科汇电力自动化公司, 山东 淄博 255087)

摘要: 介绍智能电网自愈的基本概念, 阐述配电网自愈功能及相关技术, 提出采用自愈速度和供电自愈率指标来评价配电网的自愈能力。把自愈速度分为毫秒级、周波级、秒级与分钟级四个级别; 将供电自愈率定义为在统计期(如一年)内故障自愈恢复的总用户数与受故障影响的总用户数的百分比值。对我国开展短时停电损失研究、配电网自愈相关技术应用研究等提出了建议。

关键词: 智能配电网; 自愈功能; 评价指标; 自愈速度; 供电自愈率

Self-healing and its benchmarking of smart distribution grid

LI Tian-you^{1,2}, XU Bing-yin^{3,4}

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Fujian Electric Power Company Limited, Fuzhou 350003, China; 3. Shandong University of Technology, Zibo 255012, China; 4. Kehui Power Automation Co., Zibo 255087, China)

Abstract: The basic self-healing concepts of smart distribution grid (SDG) are introduced and its self-healing functions and relevant technology are illustrated. Two indexes for benchmarking the self-healing ability of SDG, self-healing speed and self-healing rate are proposed. The self-healing speed is divided as milliseconds, cycles, minutes and seconds levels. The self-healing rate is defined as the number of customers recovered from a fault divided by the total number of customers affected by a fault. Suggestions on the loss analysis of short-time outage and the application of SDG self-healing technologies in China are presented.

Key words: smart distribution grid; self-healing; benchmarking indexes; self-healing speed; self-healing rate

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0105-04

0 引言

“智能电网(Smart Grid)”具有可靠、优质、高效、兼容、互动等特点,是现代电网的发展方向。自愈功能作为保证电网可靠、优质供电的关键功能,是智能电网技术研究的重点。近年来,国内外专家就提高大型输电网自愈进行了大量的研究,取得了一系列研究成果^[1-6];而对配电网自愈的研究相对较少^[7-8]。配电网直接面向用户,其自愈水平的高低直接影响电网对用户的供电质量。本文介绍智能电网自愈的基本概念、阐述配电网自愈功能及相关技术,提出评价配电网自愈能力的指标体系,并对我国开展智能配电网自愈研究工作提出建议。

1 智能电网自愈的基本概念

电网自愈的概念最早出自美国电科院(EPRI)与美国能源部于1999年启动的“复杂互动系统”联

合研究计划^[1]。后来美国电科院的“智能电网(Intelligrid)”、美国能源试验室的“现代电网(Modern Grid Initiative)”研究项目都把自愈作为主要研究内容^[2-3]。作为保障电网安全稳定运行与提高供电质量的核心技术手段,自愈技术是当前智能电网研究的热点内容。

电网的自愈(Self Healing)是指其在无需或仅需少量的人为干预的情况下,利用先进的监控手段对电网的运行状态进行连续的在线诊断与评估,及时发现并快速调整,消除故障隐患;在故障发生时,能够快速隔离故障、自我恢复,不影响用户的正常供电或将故障影响降至最小。就像人体的免疫功能一样,自愈使电网能够抵御并缓解各种内外部危害(故障),保证电网的安全稳定运行和供电质量。

从自愈功能的含义与技术内容来讲,它并不是一个全新的概念。我们以前熟悉的继电保护与安全自动装置,都属于自愈功能的范畴。另一方面,自

愈是传统继电保护与安全自动装置技术的发展，它的终极目标是为用户提供永不间断的理想电力，其内容更为丰富、完善。自愈技术的研发与推广应用，对于建设智能电网，提高供电质量具有十分重要的意义。

2 智能配电网的自愈功能与相关技术

智能配电网 (Smart Distribution Grid, SDG) 是智能电网中配电网部分的内容。它实现自愈的根本目的是保证供电质量。

2.1 配电网的供电质量

供电质量是满足用户电力需求的质量。根据目前国家有关标准，供电质量包括供电可靠性和电能质量两个方面。供电可靠性是指对用户连续供电的可靠程度，其指标是对用户停电时间和次数的统计，直接体现了配电网对用户连续供电的能力。随着社会经济的发展，供电质量不合格造成的经济损失及对社会的影响越来越大。据美国能源部的报告^[9]，美国每年供电中断至少造成 1 500 亿美元的停电损失，平均每人损失 500 美元。而电能质量是指供应到用户受电端电能的品质，衡量电能质量水平的指标有电压偏差、频率、电压波动与闪变、谐波、三相不平衡五项，这都有相应的国家标准。

随着变频调速设备、可编程逻辑控制器等数字化设备以及各种自动生产线、计算机系统的大量应用，电压骤降所造成的影响日益突出。所谓电压骤降，根据 IEEE Std.519-1992 的定义，是指供电电压有效值突然降至额定电压的 90%~10% (0.9~0.1 p.u.)，并持续半个周波至 1 min，然后又恢复至正常电压。电压骤降现在国内外虽然还没有统一的定义，但却是危害最大的电能质量问题。据有关统计，在用户电能质量问题投诉中，由于电压骤降原因造成的占 80%以上。

此外，配电网中还存在大量的供电短时中断(短时停电)现象，例如配电线路瞬时性故障时的跳闸又重合成功、线路故障自动隔离与非故障区段恢复供电、变电所备自投装置动作等都会引起用户供电出现数秒到数分钟的停电。这类短时停电在供电可靠性指标中是不纳入统计的。我国原能源部的 [1991]363 号文《供电系统用户供电可靠性统计办法》中明确规定，“对供电系统停电时间不超过 3 min 的各类操作(如调电操作、开关跳闸后试送成功等)不应视为对用户停电”。后来颁布的 DL/T836—2003 号文《供电系统用户供电可靠性评价规程》虽然删去了这条款，但在实际操作中，还是不把短时停电纳入可靠性统计中。

短时停电与电压骤降往往会导致高科技用电设备运行不正常，造成用户产品报废、大型生产线停机事故，带来巨大的经济损失。从避免用电事故、减少用户损失角度出发，也应将这两项内容纳入供电质量研究的内容，并作为智能配电网自愈功能解决的问题。

2.2 智能配电网的自愈功能

对电网自愈的研究分成输电网与配电网两部分内容。由于发挥的作用、网络结构与运行方式等有着很大的差异，输电网与配电网对自愈功能要求也不同。

输电网担负着将电能从大型发电厂输送到负荷中心的功能，主要采用多电源供电的环网结构，其中一个甚至多个元件退出运行，不会影响系统的正常供电。因此，输电网自愈功能首先是实现电力设备状态的在线监测，及时发现并排除故障隐患，通过快速继电保护切除故障元件；再者是对系统进行在线安全评估和预警控制，防止出现电网稳定破坏导致的大面积停电事故。

配电网的作用是向用户分配电能，一般采用辐射型供电方式。它直接面向用户，其中的任何故障、电能质量扰动都会影响对用户的正常供电。因此，智能配电网自愈功能首先是减少故障停电时间与停电次数，特别是避免目前配电网大量存在短时停电问题，提高供电可靠性；其次是优化电能质量，尤其是要解决电压骤降问题；最后是有效抵御外部攻击，提高配电网防灾防破坏能力。

2.3 智能配电网自愈的相关技术

智能配电网自愈功能的实现，以计算机、通信、传感与测控、电力电子以及人工智能等多项技术的综合应用为基础，涉及配电网规划、一次网架设计、继电保护、在线监测、运行监控与自动化等多个技术领域。

配电自动化中的馈线自动化技术实现配电线路故障自动定位、隔离与恢复供电，是智能配电网自愈的基础支撑技术。目前的馈线自动化主要依赖分段开关顺序重合或配电自动化主站远方遥控来实现，故障隔离与自动恢复供电的时间在 60 s 以上。下一步的发展方向是采用基于 IP 通信的分布式智能技术，馈线终端之间实时交换故障检测信息与控制命令，实现故障的就地隔离与恢复供电，将恢复供电时间降低至 1~2 s 以内，实现更为快速的自愈。如果采取配网闭环运行方式，采用差动保护直接跳开故障区段两端的开关，则可快速切除故障，避免故障引起供电中断，实现无缝自愈。

智能配电网自愈的另一支撑技术是柔性配电

(DFACTS) 技术, 它是柔性交流输电 (FACTS) 技术在配电网的延伸。DFACTS 设备包括动态不停电电源 (DUPS)、动态电压恢复器 (DVR)、固态断路器 (SSCB)、固态负荷转移开关 (SSTS)、静止无功发生器 (SVC)、静止同步补偿器 (STATCOM) 等。DFACTS 在提高配电网自愈功能方面具有重要的作用。首先, 应用 SSCB、SSTS 可以加快故障切除与负荷转移切换时间, 提高自愈速度。而利用 DUPS 与 DVR 可以补偿配电网故障重合闸、故障隔离操作引起的短时供电中断, 保证重要敏感负荷供电不受影响。此外, 应用 SVC、STATECOM 可以消除电压骤降、谐波、电压波动的影响, 提高电能质量。

3 智能配电网自愈能力的评价指标

制定技术指标体系, 科学地评价配电网的自愈能力, 是智能配电网自愈研究的重要内容。目前, 国内外还没有智能电网自愈能力的评价标准, 为此本文提出了一套评价智能配电网自愈能力的初步方法与技术指标体系。

配电网的自愈能力, 可从自愈速度与自愈率两方面来评价。

3.1 自愈速度指标

配电网故障对用户的影响体现在供电中断与电压骤降两个方面。不同的用电设备受供电中断与电压骤降影响的程度是不一样的。根据供电中断与电压骤降对用电对象的影响严重程度, 可将电力负荷分为如下三类^[10]。

1) 普通负荷。即供电中断与电压骤降扰动造成的经济损失与社会影响较小的电力负荷。如一般照明设备与家用电器、电加热器、通风机等。

2) 敏感负荷。指几个周波的供电中断或电压骤降会对其造成影响和危害的电力负荷, 如可编程控制器、变频调速装置等。

3) 严格负荷。指对供电质量要求非常严格, 出现一周波以上的供电中断或电压骤降即会对其造成严重影响和危害的负荷, 如集成电路芯片制造流水线、银行与证券中心的计算机系统。

由此可见, 智能配电网自愈速度的快慢直接关系到对用户的影响程度。因此, 我们可根据自愈速度的快慢来量化描述智能配电网的自愈能力, 以此作为评价智能配电网自愈能力的一项量化指标。综合考虑对用户的影响及其所采取的自愈技术, 可将自愈速度分为四级。

(1) 一级自愈速度, 也称为毫秒级自愈, 指时间在一周波 (50 Hz 电网是 20 ms) 以内的自愈恢复,

其作用是让用户没有“感觉”, 因此可称为“无缝自愈”。

(2) 二级自愈速度, 也称为周波级自愈, 指时间在一周波以上、几十毫秒以内的自愈恢复, 对普通负荷和一般敏感负荷基本无影响。

(3) 三级自愈速度, 也称为秒级自愈, 指时间在几秒钟内的自愈恢复, 对敏感负荷有一定影响, 但对普通负荷无影响。

(4) 四级自愈速度, 也称为分钟级自愈, 指时间在 3 min 内即自愈恢复, 虽用户都“感觉”到停电, 但短时间得到恢复, 会影响敏感负荷的正常运行, 但对普通负荷基本无影响。

对于停电时间超过 3 min 的, 则为不自愈, 在供电可靠性指标里统计为停电。这样, 自愈速度指标就描述了智能配电网对 3 min 之内短时停电与电压骤降的自愈恢复功能。当然, 自愈速度的选择是一个技术经济问题, 自愈速度越快, 就意味着电网装备投入越大, 因此针对具体的配电网, 要从满足用户负荷要求出发, 选择适中的自愈速度。

自愈速度指标也作为评价智能配电网某一馈线或者某一小区配电网自愈能力的指标。

3.2 供电自愈率指标

供电自愈率指标用于描述一个区域直至一个城市的配电网对故障的自愈恢复能力。

第一个供电自愈率指标是供电故障自愈率, 其定义为在统计期 (如一年) 内故障自愈恢复的总用户数与受故障影响的总用户数的百分比值, 即:

$$\text{供电故障自愈率} = \frac{\sum(\text{每次故障自愈的用户数})}{\sum(\text{每次故障影响的总用户数})} \times 100\% \quad (1)$$

式中: “每次故障影响的总用户数”指故障影响范围内线路连接的用户数; 而“每次故障自愈的用户数”指由于配电网自愈操作供电没受故障影响或经历短暂停电后恢复供电的用户数, 它是故障影响范围内连接的用户数与实际遭受停电用户数之差。故障是通过变电站保护与故障录波装置记录到的故障次数来统计, 受影响的用户数是根据故障时网络运行结构与受影响线路连接的用户数来统计; 而实际停电用户数可通过配电网终端和智能电表记录来统计。

另一个供电自愈率指标是用户平均自愈次数, 它是每个用户在统计期 (如一年) 内遭受故障的平均自愈成功的次数, 即:

$$\text{用户平均自愈次数} = \frac{\sum(\text{每次故障自愈的用户数})}{\text{总用户数}(\text{次/户} \cdot \text{年})} \quad (2)$$

供电自愈率与供电可靠性指标密切相关。供电自愈率指标描述了配电网在减少故障停电方面的自愈能力, 自愈能力强的配电网其供电可靠性则高。

事实上, 供电自愈的效果还与自愈速度有关, 自愈速度的快慢直接关系到对敏感用户的影响程度。严格地讲, 作为评价整个配电网自愈功能的供电自愈率指标还应考虑这些因素, 这有待进一步的研究完善。

4 结语

配电网直接连接用户, 是保证供电质量的中心环节。在我国, 电力用户遭受停电的时间有 95% 以上是配电网造成的 (扣除发电不足的原因); 造成电能质量问题的主要因素也在配电网。而智能配电网代表着未来配电网的发展方向, 其自愈功能在于减少停电、提高供电质量、提供优质电力从而带来显著的效益。因此, 结合我国实际开展智能配电网自愈功能的技术研究和应用, 具有十分重要的作用和意义。

当前, 要进一步系统研究分析停电造成当今经济社会的影响, 进一步确立以供电可靠性为核心的价值观; 要进一步系统研究分析配电网供电短时停电 (3 min 之内) 的原因及对用户造成的影响, 并且开展这方面的统计工作, 以利于自愈技术的研究应用; 要进一步系统研究衡量配电网自愈能力的指标体系, 科学客观全面地反映自愈功能水平, 使之成为智能配电网技术指标体系的重要组成部分; 要结合配电自动化的实施, 对配电数据通信网络技术、先进的测控保护技术等自愈相关技术进行应用研究, 以提高现阶段配电网的自愈水平, 提高供电质量。同时, 要加强技术交流, 跟踪国内外技术发展动态, 推动配电网自愈技术的发展, 进而推动我国智能电网的发展。

参考文献

- [1] Massoud Amin. Toward self-healing energy infrastructure systems[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2001, 14 (1): 20-28.
- [2] EPRI. Power delivery system and electricity market of the future, 1009102 [R]. Palo Alto, CA, USA: EPRI, 2003.
- [3] National energy technology laboratory, US department of energy[R]. The Modern Grid Initiative, 2008.
- [4] YANG Qi-xun, BI Tian-shu. WAMS implementation in China and the challenges for bulk power system protection. Panel session: developments in power generation and transmission—infrastructures in China[C]. //IEEE 2007 General Meeting. Tampa, FL, USA: 2007: 24-28.
- [5] Liu Chen-ching. Strategic power infrastructure defense[C]. //IEEE Power Engineering Society General Meeting. USA: 2004.
- [6] Gomes P, Garini A P. Power restoration practices: The Brazilian experience[C]. //CIGRE. Paris: 2006: 27-31.
- [7] 余贻鑫. 面向 21 世纪的智能配电网[J]. 南方电网技术, 2006, 2(6).
YU Yi-xin. The smart distribution grid facing 21st century[J]. South China Power Grid Technology, 2006, 2(6).
- [8] 王成山, 王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (20): 1-4, 31.
WANG Cheng-shan, WANG Shou-xiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (20): 1-4, 31.
- [9] The US department of energy. The smart grid: an introduction[R]. 2007.
- [10] 李天友, 金文龙, 徐丙垠. 配电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
LI Tian-you, JIN Wen-long, XU Bing-yin. Distribution technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.

收稿日期: 2009-11-15; 修回日期: 2010-03-17

作者简介:

李天友(1963-), 男, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为配电技术; E-mail: ltyxm@163.net

徐丙垠(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力线路故障监测、配电自动化。

作者更正

《一种基于等效模型电网动态过程状态估计方法》的文章, 在《电力系统保护与控制》杂志第 38 卷第 11 期 2010 年 6 月 1 日刊登, 该文章的第一撰稿人---赵亮, 原稿为华北电力大学, 河北 保定 071003; 现更正为: 华北电力大学, 北京 102208;