

面向能源互联网的智能配电网安全态势感知

徐 成¹, 梁 睿^{1,2}, 程真何³, 徐敦彬³

(1. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 物联网研究中心, 江苏 徐州 221116; 3. 国网徐州供电公司, 江苏 徐州 221000)

摘要: 面向能源互联网, 提出基于柔性直流互联, 以交流变压器为核心、直流母线为框架的交直流混合城市配电网互联结构。以能源互联网的目标和特性为准则, 说明该种方案符合能源互联网要求, 对可再生能源发电具有高兼容性。利用拓扑可视化工具, 将传统电网、BA 网络以及所提混合配电网结构抽象成拓扑模型, 通过随机删除网络结点模拟网络攻击, 对以上 3 种网络进行安全态势分析, 证明所提结构具有更强的鲁棒性。

关键词: 能源互联网; 配电网; 拓扑; 安全态势; 态势感知; 鲁棒性

中图分类号: TM 71

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.06.003

0 引言

作为智能电网的扩展, 能源互联网概念逐步发酵, 呈现出“百家争鸣”的良好研讨态势, 其含义不断扩展和深化^[1]。电能具有清洁、高效、便于传输和分配等特性, 电力系统将在能源互联网中发挥主干作用已成为共识。而配电网作为未来电网的重要组成部分, 既是能量消耗终端, 也是分布式能源的接入载体, 要求未来配电系统面向能源互联网演化发展成为必然趋势^[2]。

广义上的能源互联网并没有确切定义, Rifkin 率先提出以新能源技术和信息技术的深入结合为特征的能源体系即将出现, 并称之为能源互联网^[3]。狭义上讲, 它是一种适应高渗透率分布式可再生能源发电和分布式储能并网的高效配电系统^[4]。这种新型配电网具有如下能力: 分布式电源和分布式储能设备能随时并网, 即插即用; 负荷、分布式电源、分布式储能设备广泛互联; 能量与信息以能量信息流的方式在能源路由器间储存转移^[5], 实现电能的双向按需传输和动态平衡; 具有近乎完美的电能质量; 具有创新性的保护装置; 在随机攻击下, 具有良好的鲁棒性和生存能力^[6]等。

态势感知 SA(Situation Awareness), 是人在决策过程中, 对环境信息的感知、理解和预测。文献[7]最早提出态势感知定义, 认为态势感知是在特定时间和空间下, 操作者对当前设备和环境的动态变化的察觉和综合。态势感知主要面向不确定性强、人必须介入决策的大型或巨型动态复杂系统, 主要应用于经济、生态、战场、巨型网络系统等领域, 也包括智能电网。在智能电网的更高级阶段——能源互联网

条件下, 电网形态更为复杂, 接入设备更具多样性, 对电网的态势感知将面临新的变化和挑战。结合能源互联网理念, 着眼于对未来广泛互联、高度融合的配电系统形态进行研究与展望, 面向能源互联网对配电网进行态势感知分析, 具有很强的前瞻性意义。

目前, 安全预警技术和可视化技术研究是电网安全态势感知研究的重要内容^[8-11]。文献[9]提出基于相量测量单元 PMU(Phasor Measurement Unit)的决策树算法的实时安全评估策略, 用以对系统的电压越限 VMV(Voltage Magnitude Violation)、温度越限 TV(Thermal limit Violation)、电压稳定 VS(Voltage Stability)、暂态稳定 TS(Transient Stability)进行实时评估; 文献[10]结合自回归(AR)、最小二乘支持向量机(LSSVM)、RBF 神经网络预测模型, 提出基于信息融合的组合预测方法; 文献[11]针对态势感知的可视化对象建模, 提出智能电网态势管理概念模型设计算法。以上研究均针对传统电网电气量, 很少涉及电网的拓扑特征。

本文首先以“花瓣式”配电网模型为蓝本, 提出相邻闭环柔性直流互联的新型配电网络。此模型以交流变压器为核心、直流配电线路为联络框架, 适应分布式电源、直流负载的高渗透率接入。然后, 提出基于拓扑理论的安全态势分析方法, 即建立网络拓扑模型, 通过随机删除网络结点模拟系统所受攻击, 计算网络在不同程度攻击下的连通度, 并分析其变化特征, 以此反映网络的安全态势。最后, 比较所提网络与经典 BA 网络、传统电网的安全态势特征, 验证所提配电网模型具有更强的鲁棒性。

1 基于柔性直流互联的交直流混联网络

1.1 传统闭环运行模式

能源互联网是智能电网的升级版, 其发展脱离

收稿日期: 2016-03-01; 修回日期: 2016-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51504253)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51504253)

不了传统电网形态^[12]。鉴于能源互联网广泛互联、对等开放、低碳高效、多源协同、安全可靠的技术特征^[13],可以预测配电网的闭环运行是能源互联网建设的重要途径。目前,国内外配电系统闭环设计形式主要有单环、双环、手拉手、梅花型等,如图 1 所示。其中,新加坡“梅花型”和巴黎“手拉手”环形最具代表性^[14]。“梅花型”配电网,即一个变电站出线通过开闭所联络构成一个花瓣环网,该花瓣又与其他变电站的花瓣相切连接,一个变电站可以有多个花瓣。“手拉手”配电网将变电站母线通过若干开闭所与相邻变电站连接,最终回到本变电站,形成环网。配电网闭环运行本身就是一种互联形式,上述 2 种闭环运行方式在形式上初具互联特征,为未来能源互联网的实现提供了框架基础。

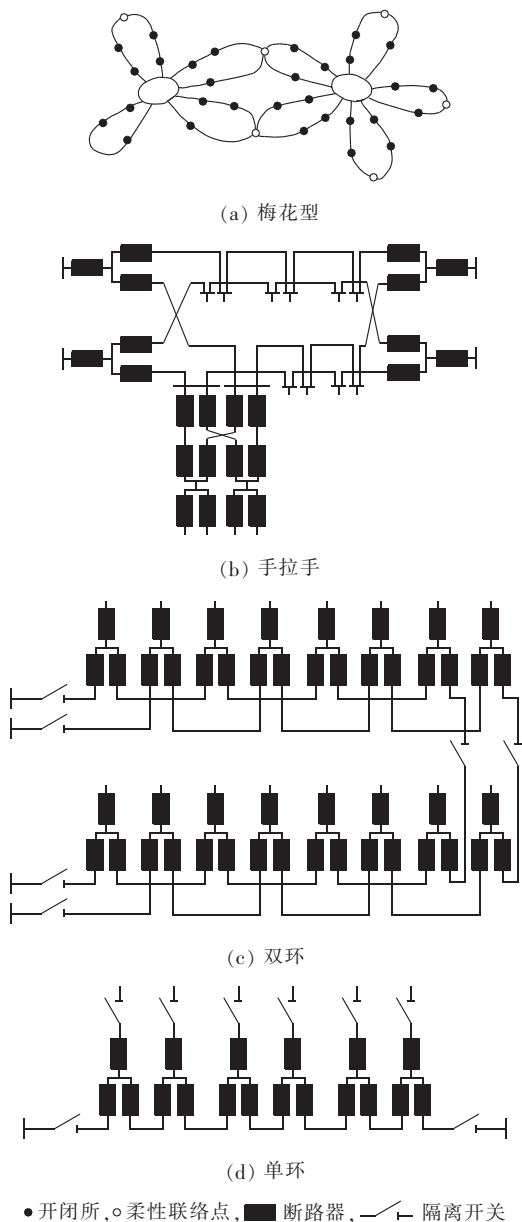


图 1 环网闭环连接方式

Fig.1 Connection patterns of closed-loop network

1.2 柔性直流互联网络

目前,世界上能源互联网雏形的电力系统网架大都包含交流电压母线和直流电压母线,通过交流电压母线向交流负荷供电,直流电压母线接入分布式发电、储能、直流负荷及变频负荷等。同时,为了不增加交流系统的短路容量,不构成电磁环网并实现功率双向可控的目标,各个区域之间的电网需要通过柔性直流技术进行互联。

柔性直流输电是基于电压源换流器 VSC(Voltage Source Converter)、自关断器件和脉宽调节技术的新型输电技术。VSC 通过调节换流器出口电压的幅值和与系统电压之间的功角差,可以独立地控制输出的有功功率和无功功率。从交流系统的角度看,VSC 换流站可以等效成一个无转动惯量的电动机或发电机,可以在 PQ 四象限内实现有功功率和无功功率的独立控制。并且 VSC 没有无功补偿问题,可以为无源系统供电,占地面积小,适合构成多端直流系统和城市配电网互联^[14]。

传统“花瓣式”配电网原则上不跨区供电,只有在故障时需要负荷转供的情况下,环间联络开关才闭合。此种跨区域供电模式无法满足潮流实时双向传输并实现电能分布的动态平衡。而 VSC 的诸多优势特别适合解决上述问题。例如,文献[15]提出在 110 kV 变电站 10 kV 侧实现中压直流互联的方式,以实现配电网和微电网之间的潮流主动控制。

本文提出一种新型的环网互联方式,即以“花瓣式”配电网为蓝本,用 VSC 装置取代环网间的联络开关,在环网的末端,用 VSC 装置和相邻环连接。在此基础上,通过直流母线将各个 VSC 联络结点互联,形成如图 2 所示的“田”字型交直流统一混合网络

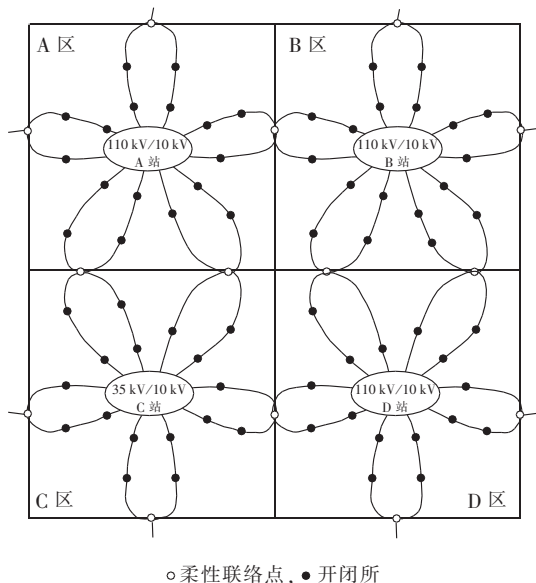


图 2 DUHN 模型

Fig.2 DUHN model

DUHN(DC-AC Unified Hybrid Network)。此种配电网以交流变压器为核心、直流母线为框架,各个相邻供电区域柔性互联。该种结构具有如下优点。

a. VSC 换流站本身可以提供无功功率,减少了变电站侧电容补偿器的投资。

b. 方便可再生能源和储能设备的高渗透式接入。光伏、风电等分布式能源在直流母线侧即插入,并且直流母线可以作为电动充电桩的电源,如图 3 所示。未来电动汽车大规模使用,其本身可以既作为直流负载也可作为直流储能装置。未来配电系统将从“单侧随机系统”转变为“双侧随机系统”^[16],即同时具有用户负荷的随机性和可再生能源并网发电的随机性,直流母线为大容量储能设备提供接入空间,从广义上提升了分布式能源的接入容量,有利于负荷转移、削峰填谷,有利于应对风电和光伏的随机性和不确定性,提高可再生能源的利用率。

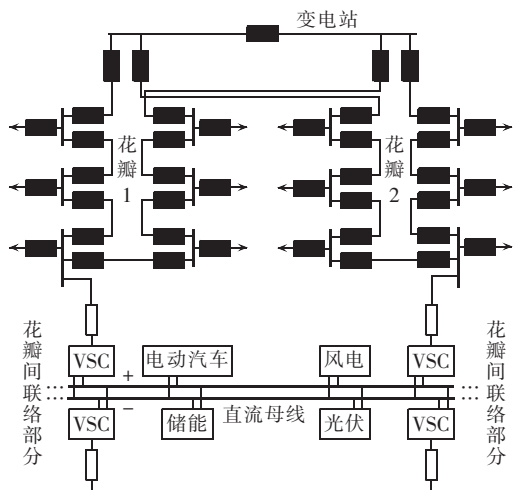


图 3 环网间联络示意图

Fig.3 Schematic diagram of interconnection between loops

c. 广泛互联,可实现潮流的双向主动控制,实现能源的最优利用。

“消耗侧”互联而不是“供给侧”互联,分布式能源更接近用户,方便用户侧分布式能源接入;“交流层”与“直流层”跨界互联,交直流优势互补,用户可以平等地获取交流电能和直流电能,实现交直流的有机统一;区域间互联,VSC 起到能源路由器的作用,可实现电能在区域间的灵活转移,降低单一区域随机高负荷的压力,对缺电区域进行支援供电。

d. 去中心化。传统配电网中,交流变压器作为中心,起着决定性作用。而能源互联网中,变压器的中心性将被弱化,用户的地位将提升。能源互联网需要打破垄断,去中心化,不同参与者之间处于对等的位置,在此基础上进行对等的交易。能源的生产和消费也是对等的,不再是单向的生产跟踪消费模式,而是双向甚至多边的^[17],每个个体既可以作为电能的消费者,也可作为电能的生产者。所提的交直流统一混

合结构框架是一种扁平化设计,为未来能源互联网的商业化、市场化运作提供必要条件。

e. 交流侧接地故障发生后,VSC 对故障电流形成隔离,故障不会扩大到相邻区域。只要交流侧电压不为零,柔性直流输电设备的功率输送就不会中断。

电能受空间约束、时间约束、无(精确)溯源性的物理属性约束,这决定了分布式能源的开发和利用在局域范围内最经济^[18]。DUHN 可看作是区域协调、局域自治的局域能源互联网,通过合理的运作机制,在局域内进行“源、网、荷、储”的互动,使能源在局域内达到最优平衡。

2 基于拓扑的安全态势感知

为应对规模不断升级的网络和庞大复杂的信息系统,对网络的图进行可视化分析,具有很强的创新性和必要性^[19]。灵活、简装的拓扑构架是电力网络的追求目标^[20],但随着城市的发展,配电网的复杂程度不断提高,未来交直流混合的能源互联网成为发展趋势。互联网是具有着强大融合能力的生态环境,在建设目标、功能特性、协议支持和服务范畴等方面,互联网可对能源互联网的设计和分析提供宝贵经验^[21]。互联网的拓扑结构影响了其诸多特性,因此,有必要从网络拓扑角度对配电网进行安全态势感知。

2.1 模型建立

首先,互联网是小世界网络,其平局最短路径长度远小于其他随机网络,并且和网络的规模无关;其次,互联网是一个无尺度网络,其度分布服从幂律分布。无论是配电网还是输电网,其结构发展都有逐渐复杂化的趋势,初具复杂网络的特征。从定性分析上看,电网与互联网有一定的相似之处,但从定量上看,其拓扑特征具有一定的差异性。

1999 年美国圣母大学 Barabási 与 Albert 发现了大量网络在成长过程中的连接偏好依附性,提出了无尺度网络模型^[22],简称 BA 网络。本文将 BA 网络 and 传统电网作为参考对象,分析所提电网模型的拓扑特征。

BA 网络模型建立算法如下。

a. 增长。开始于少量结点 m_0 ,在每个时间间隔添加 1 个具有 $m(m \leq m_0)$ 条边的新结点(连结到已存在于系统中的 m 个结点上)。

b. 择优连结。当选择与新结点连结时,假设新结点连结到结点 i 的概率 π 取决于该结点的连通度 k_i ,即 $\pi(k_i) = k_i / \sum_j k_j$,在 t 个时间间隔后,模型产生一个有 $N = m_0 + t$ 个结点和 mt 条边的随机网络,随着 t 的增大,该网络演化进入标度不变状态。

利用拓扑可视化工具 Gephi 建立 1000 结点的 BA 网络,如图 4(a)所示。本文以 4941 结点的美国

电网作为传统电网代表进行分析,如图 4(b)所示,显然,传统电网和小世界网络在拓扑形态上存在明显差异。根据本文所提交直流混合配电网特征,建立一个 25 区域 341 结点的 DUHN,如图 4(c)所示。

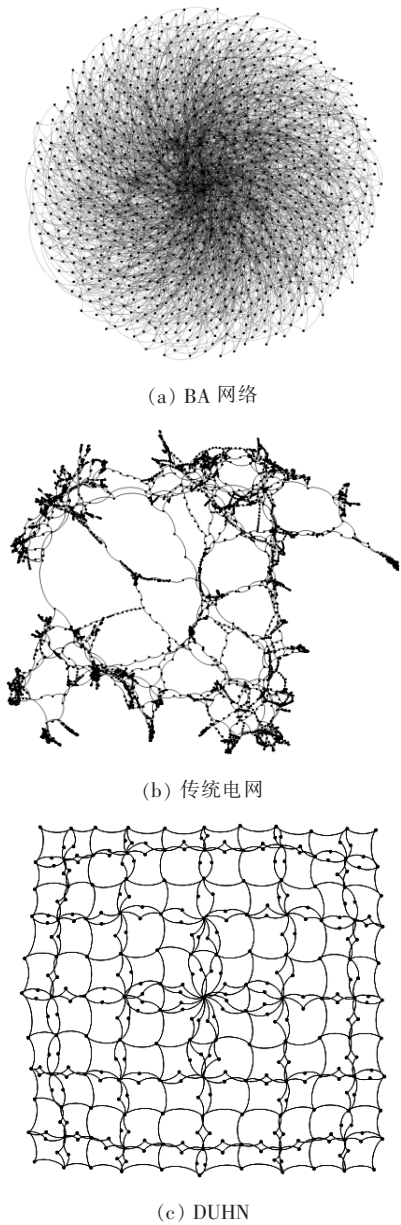


图 4 3 种网络拓扑可视化图形

Fig.4 Visualized structure for three network types

DUHN 有 25 个交流变电站,中心区域为重要负荷区域,其变电站接有 8 个“花瓣”,分别与相邻 4 个区域连接,中心区域相邻的 4 个区域各有 5 个“花瓣”,其余 20 个区域各有 4 个“花瓣”;每个环网支路设有一个结点,用以表示用户开闭所。

2.2 计算分析

结点的度,即与该结点连接的边的数目,反映了该结点在网络中的重要程度。一般网络中有少数的高度值结点,位于网络中心。上述 3 种网络的度分布如图 5 所示。可以看出,网络中大部分结点具有低度

值,中心结点具有较大的度值,并且 3 种网络的度分布具有相似性。

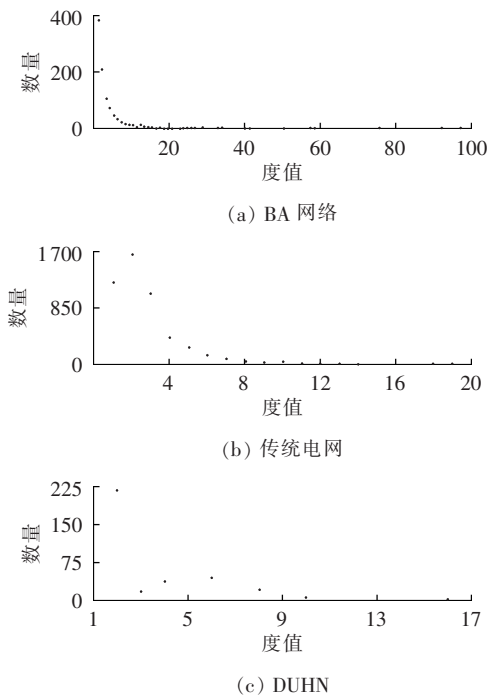


图 5 3 种网络度分布

Fig.5 Nodal degree distribution for three network types

采用平均最短路径 APL(Average Path Length)表示网络中结点的可连通性。在一个网络结点总数为 n 的无向网络中,任意 2 个结点 i,j 之间的最短路径表示为 d_{ij} 。则整个网络的平均最短路径 l 定义为所有结点对 i,j 之间的最短路径的平均值,即:

$$l = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}$$

其中,当网络结点 i,j 之间不可达时, $d_{ij}=0$ 。对于配电网,平均最短路径另外一层物理意义是能量在 2 个结点间传输的平均最短路径,平均最短路径越小则电能网损越小。

上述 3 种网络的各项参数计算结果如表 1 所示。

表 1 传统电网、DUHN、BA 网络参数比较

Table 1 Comparison of network parameters among traditional power grid,DUHN and BA network

参数	传统电网	DUHN	BA 网络
结点数量	4941	341	1000
边数量	6594	556	2994
最大度	19	16	97
平均度	2.669	3.261	5.988
平均最短路径	18.989	8.449	3.564
网络直径	46	20	6

平均度和平均最短直径 2 项参数与网络规模相关性不大,可以反映网络的基本特性。由表 1 可看出,DUHN 的平均度更接近 BA 网络,平均最短路径远小于传统电网,更接近 BA 网络。因此,DUHN 相比传统网络,更加具有小世界特性。

研究表明,删除网络中的结点,网络的连通性会改变^[22];并且随着删除结点的增多,网络的平均最短路径先变大后变小。当删除了足够多的结点时,网络变得支离破碎,其平均最短路径开始明显升高。平均最短路径反映了网络的连通性,通过观察随机删除结点后平均最短路径的变化趋势,可以预测网络的抗攻击能力,对网络的拓扑安全态势进行感知。

图6为3种网络的平均最短路径随删除结点百分比升高的变化趋势。可看出,传统电网在随机删除结点百分比达到8%时,网络连通性显著下降,而BA网络和DUHN具有较低的平均最短路径,表明具有较好的网络连通性,并且平均最短路径变化幅度不大,变化趋势平稳,具有更强的鲁棒性。因此能源互联网较传统电网在抗攻击能力上大幅提高。

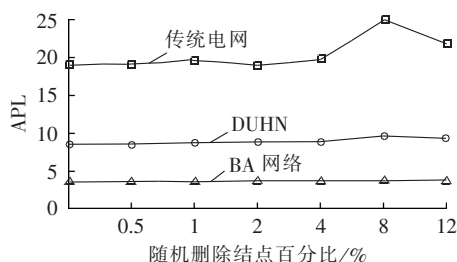


图6 随机攻击对连通性的影响

Fig.6 Effect of random attack on network connectivity

3 结语

在环境、经济、社会、技术多重驱动力影响下,能源互联网将成为应对未来环境危机和能源危机的重要途径。本文提出一种基于柔性直流互联的DUHN构架,有利于分布式能源的广泛接入、能量的灵活双向传输以及资源的优化与整合。与传统电网比较,该结构在拓扑上更具有小世界网络特性,更加接近能源互联网。通过模拟随机攻击,对网络的拓扑安全态势进行预测,结果表明所提网络具有更强的抗攻击能力。本文提出的新型配电网结构,体现了平等互联、广泛共享的互联网理念,为未来能源互联网环境的配电网建设提供了理论参考与技术支撑。

参考文献:

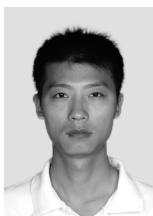
- [1] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光,等. 能源互联网:驱动力、评述与展望[J]. 电网技术,2015,39(11):3005-3013.
- SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang, et al. Energy internet: driving force, review and outlook [J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3005-3013.
- [2] 刘涤尘,彭思成,廖清芬,等. 面向能源互联网的未来综合配电系统形态展望[J]. 电网技术,2015,39(11):3023-3034.
- LIU Dichen, PENG Sicheng, LIAO Qingfen, et al. Outlook of future integrated distribution system morphology orienting to energy internet [J]. Power System Technology, 2015, 39(11):

3023-3034.

- [3] RIFKIN J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world [M]. New York, USA: Palgrave Macmillan, 2013: 31-46.
- [4] HUANG A Q. FREEDM system—a vision for the future grid [C]// Proceedings of the 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2010: 1-4.
- [5] 曹军威,孟坤,王继业,等. 能源互联网与能源路由器[J]. 中国科学,2014,44(6):714-726.
- CAO Junwei, MENG Kun, WANG Jiye, et al. An energy internet and energy routers [J]. Science China, 2014, 44(6): 714-726.
- [6] 赵海,蔡巍,王进发,等. 能源互联网架构设计与拓扑模型[J]. 电工技术学报,2015,30(11):30-36.
- ZHAO Hai, CAI Wei, WANG Jinfa, et al. An architecture design and topological model of intergrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 30-36.
- [7] ENDSLEY M R. Situation awareness in dynamic human decision making: theory and measurement [D]. Los Angeles, USA: University of Southern California, 1990.
- [8] 杨菁,张鹏飞,徐晓伟,等. 电网态势感知技术国内外研究现状初探[J]. 华东电力,2013,41(8):1575-1580.
- YANG Jing, ZHANG Pengfei, XU Xiaowei, et al. Research status of power grid situation awareness technology in China and abroad [J]. East China Electric Power, 2013, 41(8): 1575-1580.
- [9] DIAO Ruisheng, VITTAL V, LOGIC N. Design of a real-time security assessment tool for situational awareness enhancement in modern power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 957-965.
- [10] 杨鹏,马志程,靳丹,等. 面向智能电网的网络态势评估模型及感知预测[J]. 兰州理工大学学报,2015,41(4):99-103.
- YANG Peng, MA Zhicheng, JIN Dan, et al. Evaluation model of network situation and its awareness prediction oriented to intelligent power grid [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2015, 41(4): 99-103.
- [11] 章坚民,陈昊,陈建,等. 智能电网态势图建模及态势感知可视化的概念设计[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):168-176.
- ZHANG Jianmin, CHEN Hao, CHEN Jian, et al. Smart grid situation awareness diagram modeling and conceptual design of situation awareness visualization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 168-176.
- [12] 邓建玲. 能源互联网的概念及发展模式[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):1-5.
- DENG Jianling. Concept of energy internet and its development modes [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 1-5.
- [13] 田世明,栾文鹏,张东霞,等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3482-3494.
- TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [14] 吴涵,林韩,温步瀛,等. 巴黎、新加坡中压配电网供电模型启示[J]. 电力与电工,2010,30(2):4-7.
- WU Han, LIN Han, WEN Buying, et al. Revelation on power models of MV distribution network of Paris and Singapore [J]. Electric Power and Electrical Engineering, 2010, 30(2): 4-7.
- [15] 王一振,赵彪,袁志昌,等. 柔性直流技术在能源互联网中的应用

- 用探讨[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3351-3560.
- WANG Yizhen, ZHAO Biao, YUAN Zhichang, et al. Study of the application of VSC-based DC technology in energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3351-3560.
- [16] 曾鸣, 杨雍琦, 向红伟, 等. 兼容需求侧资源的“源-网-荷-储”协调优化调度模型[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(2): 102-111.
- ZENG Ming, YANG Yongqi, XIANG Hongwei, et al. Optimal dispatch model based on coordination between “generation-grid-load-energy storage” and demand-side resource [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 102-111.
- [17] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
- SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8.
- [18] 姚建国, 高志远, 杨胜春. 能源互联网的认识和展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 9-14.
- YAO Jianguo, GAO Zhiyuan, YANG Shengchun. Understanding and prospects of energy internet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 9-14.
- [19] MA K L, MUELDER C W. Large scale graph visualization and analytics[J]. IEEE Computer Society, 2013, 46(7): 39-46.
- [20] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 6-16.
- [21] KESHAV S, ROSENBERG C. How internet concept and technologies can help green and smart the electrical grid [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(1): 109-114.
- [22] BARABÁSI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509.

作者简介:



徐 成

徐 成(1989—), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为供配电安全技术(E-mail: 632396894@qq.com);

梁 睿(1981—), 男, 江苏连云港人, 研究员, 博士, 通信作者, 研究方向为电力系统继电保护与矿山供电安全(E-mail: cumtlr@126.com);

程真何(1966—), 男, 江苏沛县人, 研究员级高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统生产、建设;

徐敦彬(1974—), 男, 江苏丰县人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统规划、调度运行。

Security situation awareness of smart distribution grid for future energy internet

XU Cheng¹, LIANG Rui^{1,2}, CHENG Zhenhe³, XU Dunbin³

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Iot Perception Mine Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

3. State Grid Xuzhou Power Supply Company, Xuzhou 221000, China)

Abstract: An AC-DC hybrid structure of urban distribution network is proposed for the energy internet, which is based on the flexible DC interconnection, taking the AC transformer as the core and the DC bus as the framework. According to the objectives and features of energy internet, the proposed structure meets the requirements of energy internet and is highly compatible with the renewable energy power generation. The topology models of traditional power network, BA network and AC-DC hybrid network are established by the topological visualization tool and the network security situation is analyzed for three established models by the random deletion of network nodes to simulate the network attack. Results verify that the proposed network structure has better robustness.

Key words: energy internet; distribution network; topology; security situation; situation awareness; robustness