

微电网技术应用于主动配电网的分析与展望

为了适应大规模分布式清洁能源并入配电网,可采用先进电网技术将分布式能源集成为微电网后接入至主动配电网,从而使电网运营在最佳模式。在对主动配电网以及微电网相关概念加以叙述的基础上,首先从并入至主动配电网的微电网结构、规划设计和控制方式等角度入手,详细论述了微电网技术是如何应用于主动配电网的,随后全方位分析了微电网并入主动配电网后给电网可靠性、电能质量以及管理、经济、环境和社会等层面带来的效用,最后探讨了该技术未来在主动配电网领域中的应用。

陈俊桦 江修波/福州大学电气工程与自动化学院
李功新/国网福建省电力有限公司

0 引言

近年来,为了提升电力系统的能源利用效率以及满足人们对电能质量日益严苛的要求,加之大量分布式能源(Distributed Energy Resources, DER)的接入,传统的以电力单向传输为特点的无源配电网已经无法跟上科技发展的进程,取而代之的将是电力双向传输为特点,同时具有主动控制,且能优化运行DG、可控负荷和储能装置等DER的主动配电网(Active Distribution Network, ADN)^[1-2]。

将各类型DG、储能设备、负荷及控制系统集成为微电网(Micro Grid, MG),接入至中、低压配电网,既能改变现今DG实行的“即装即忘”(fit and forget)的管理策略,使得微电源和储能设备变得“即插即用”、可调可控,又能实现孤岛运行模式与并网运行模式之间的相互切换,在常态时连接主电网,但当主电网出现故障或发生电能质量等扰动的情况下,其能自行与主网断开,

从而确保当地能源供应及电网整体运行的可靠性。

综上所述,若能将微电网作为一个具备热电联产的单独可控制单元接入至主动配电网,就可以在更好地消纳DER的同时,提升系统的稳定性、负荷响应的速率以及供电质量的可靠性,使主动配电网对DER的控制与管理更加有效,进一步促进电力行业的发展。

本文首先对主动配电网及微电网技术的相关概念进行阐述,之后分别从微电网并入至主动配电网后,网架构造及规划方案的转变、控制技术多样性的增加及综合效益的变化等方面进行分析评估,最后探讨了微电网技术在ADN中的应用前景。

1 主动配电网和微电网相关概念

1.1 主动配电网的定义

与传统单向电力传输的稳定被动配电网(Passive Distribution Networks)不同,ADN能实现对DG、储能设备和可控负荷等DER的自主协调与控制管理^[3-4],通过灵活变换电力网络结构来控制网内潮流的流动方向,优化调控ADN的运行,不仅能增强绿色能源的利用率,而且可对电力网络的高效、可靠及平稳运行给予极大地保障^[5]。

1.2 微电网的定义

微电网作为一种独立可控的特殊网络结构,具有将绿色清洁能源转换成电能的微电源、根据用户个性化需要进行自我调节的负荷、用作调节用电高峰与



陈俊桦/硕士研究生

关键词/Keywords

微电网·
主动配电网·
分布式能源·
智能配电网·

用电低谷的储能装置、决定是否与主网进行互联运行或施行独立运行的控制系统^[6-10]。汇集如此多功能的新型电网结构，能同时向用户提供电能及热能，这两种人类生产活动中不可或缺的元素，

最终通过自身的控制系统对各种能源需求进行集中调配。

下表总结归纳了传统配电网、主动配电网和微电网三者间的异同点^[11]。

表 传统配电网、主动配电网与微电网三者间的异同

比较内容	传统配电网	微电网	主动配电网
隶属关系	公共电网	客户电网	公共电网
控制模式	被动	主动	主动
潮流特性	单向的	双向的	双向的
电网构成	辐射状配电网中接入分布式电源，自动切除装置	网状配电网中接入分布式电源、储能装置、可控负荷和智能控制等	网状配电网中接入分布式电源、储能装置、可控负荷和智能控制等
分布式电源类型	通常为燃气机	热电联产系统、风电、太阳能光伏和储能装置等	风电、太阳能光伏、储能装置和其他可再生能源等

1.3 接入主动配电网的微电网结构

图1为接入主动配电网的微电网典型结构图。微电网采用单点接入的方式接入至主动配电网，与常规负荷、可控负荷、储能单元和分布式电源等一同形成了涵盖微电网模式、微电网间的互联互通模式等多模式并存的智能配电网^[12-13]。微电网与主动配电网的有效连接，能最大程度地对各类电源、负荷和储能设备进行主动调控，同时还能及时地对电力传输、信息流通的方向进行分析管理，以此提高电网资源配置的效率，提升公网的电能质量，进一步优化ADN的运行。

2 接入主动配电网的微电网规划设计

微电网作为可再生能源、电动汽车和储能装置等并入主动配电网的有效平台，能充分解决间歇性分布式能源与主动配电网的耦合问题，因此是未来主动配电网研究的热门方向。微电网可以运用一系列协调控制技术保证对自身的控制、保护及管理，因此针对接入主动配电网的微电网规划设计的研究主要从考虑多因素的优化配置及MG的选址定容、多层次综合规划和多类型DG间的互补性设计等方面进行^[14-18]。

文献[19]基于电池储能系统（BESS），提出了一种运用于微电网的以使购电成本最小化的优化算法，该算法在最小成本的约束下，可在任意时刻同时对BESS及多个DG进行有效调控。文献

[20]采用蒙特卡罗模拟方法，建立智能虚拟储能控制策略来应对可再生能源的不确定性及其渗透率的增加；文献[21]提出的优化粒子群算法能有效解决风、光和煤炭等多类型分布式发电间的互补性问题，实现了偏远地区的多联产微电网；文献[22]基于德尔菲法修正的层次分析法，综合考虑多类型DG的协调控制及电网的安全可靠、可持续发展等因素，建立了接有MG的配电网规划设计评价体系。

3 接入主动配电网的微电网控制方式

随着微电网群数量的快速增长，主动配电网的网架结构及电力潮流流向也会随之发生变化，因此寻求对微电网合理的控制方式是加快主动配电网朝着更稳定、更智能和更高效目标迈进的保证。就当前的科研现状来看，控制挂载至ADN的微电网，主要有由ADN全权控制的集中式控制、主动配电网与微电网联合控制的集中—分散式控制以及微电网群间协同控制的分布式控制3种^[23-24]。

接入主动配电网的微电网典型结构见图1。图2为集中式控制模式，在此模式中主动配电网享有对全网信息、发电计划和能量输送的全部控制权，同时结合不同的运行情况灵活制定出各种控制方案，实现了对接入至主动配电网的微电网的全面优化协调控制。但庞大的数据采集信息量及信息处理工作对主动配电网有着很大的考验。

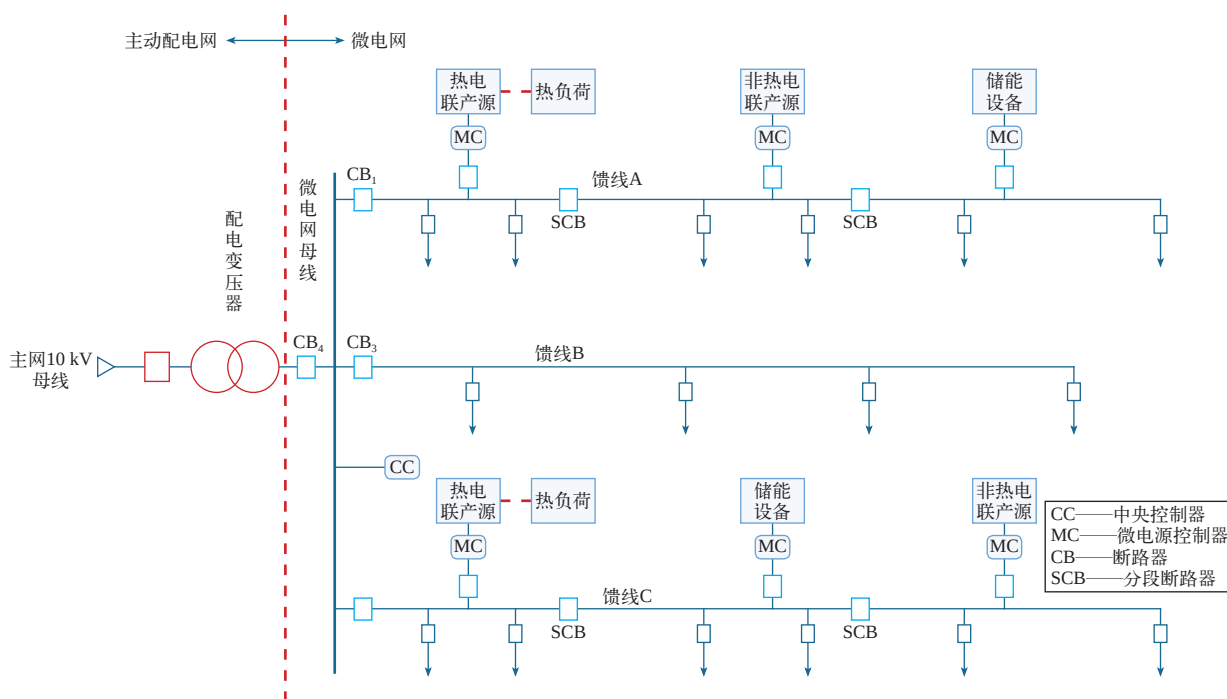


图1 接入主动配电网的微电网典型结构图

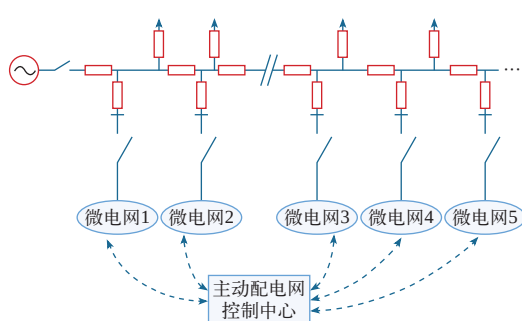


图2 集中控制模式

与集中控制模式不同，图3所示的集中—分散式控制加入微电网的自身控制，在对各类可控及不可控负荷进行合理预测的前提之下，制定出科学的发电计划，从而起到对间歇性分布式电源及主动负荷的有效调配^[25]，最后再将结果上报至主动配电网管理层，实现了控制任务的分散下放，提高了数据处理的实时性和扩展性。

图4所示的分布式控制^[26]是通过将本地微电网信息与相邻微电网群信息进行协同运行，最终确定控制方案，极大程度地确保了控制方案的可靠性，并且信息的有效率将大为提升，使得控制变得更加灵活。

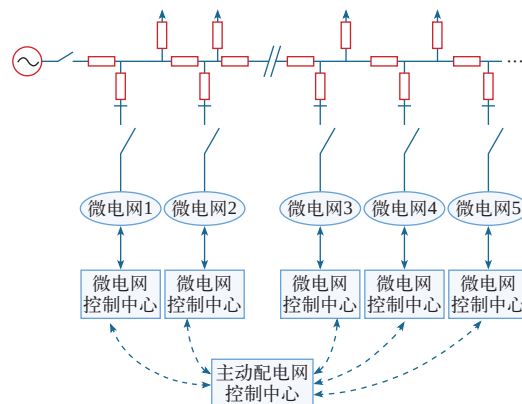


图3 集中—分散式控制

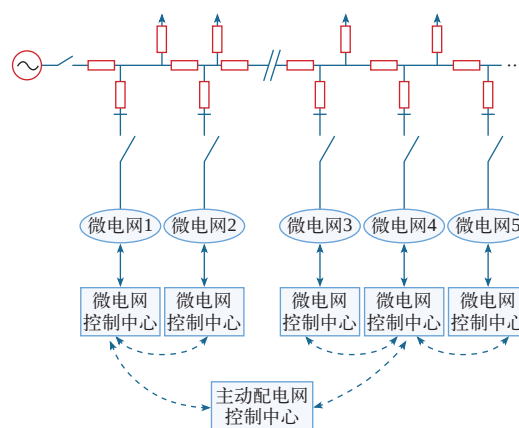


图4 分布式控制

4 在主动配电网中应用微电网技术的综合效益分析

微电网利用先进的电力电子接口将各类微电源和周围的小规模交流配电系统有机地整合在一起，很好地解决了由于大量间歇性分布式能源接入主网后，引起的配电网电能质量受损、运行可靠性降低等问题，从而更好地满足客户的正常用电需求^[27]。

4.1 使主动配电网更加高效地利用分布式能源

微电网能够做到将各类型DER和储能设备通过一系列的协调运行、优化调度后挂载在主动配电网上，并通过实时调节电力传输的方向，起到对大量DER就地柔性消纳的作用。在确保微电网群内用户能正常用电的基础上，利用微电网的能量管理系统，将统一协调后剩余的电量向上输送至主动配电网或储存至储能设备、电动汽车等，或平行输送给其他的微电网群。由此可见，将微电网技术运用于ADN中，可使传统化石能源以及新型清洁能源得以更加高效的利用^[28]。

文献[29]在仿真软件EMTP/ATP中实现对混合了风能、太阳能和水电等DG的MG的动态建模；文献[30]提出利用鲁棒控制确保集成在微电网中的低惯性风力和光伏发电机组的功率平衡；文献[31]将局部区域内的DER、储能系统及负荷看作是一个区域自治整体，建立了包含多个局部区域自治的ADN供蓄能力指标，极大程度地确保了能源的优化配置及高效利用。

4.2 使主动配电网的运行可靠性大为提升

由于微电网自身兼具联网运行与独立运行两种截然相反的运行模式。尤其是独立运行模式，可以在主电网发生任何扰动或故障时立即起动，根据负荷的优先级保障了微网群的内部供电，从而提升了微电网群所接入的相应负荷点乃至整个ADN系统的可靠性^[32-34]。

文献[35]提出将多个不间断电源系统（UPS）并行连接的微电网，该控制技术能使微电网在智能连接与孤岛模式间相互切换，并用小信号分析

的方法来验证该技术对微电网运行可靠性的改善作用；文献[36]运用一个说明性实例，对电网可靠性的相关指标进行量化分析，从而很好地验证了微电网在对减少主动配电网故障率及故障持续时间方面的优势；文献[37]将多个微电网群并入智能配电网，利用二阶抽样及分区域最小路径搜索法，大大提升了蒙特卡罗法的模拟速度和主动配电网可靠性评估的准确性。

4.3 为主动配电网的电能质量提供保证

在微电网中加入有源滤波器APF、动态无功发生器等谐波治理设备及无功补偿设备，结合微电网的柔性并网运行控制技术，很好地治理了由于大量非线性负荷并入主动配电网所导致的电力谐波污染，并能有效解决因间歇性分布式电源渗透率增加，所带来的无功功率波动性随之增大，进而造成电网电能质量无法保障的问题^[38]。

文献[39]所述方法，在分布式发电的接口转换器处接入一种新型的混合谐波过滤装置，通过基于无功功率损耗的下垂控制方法，实现了对分布式谐波污染的治理；文献[40]提出了一种基于电压跌落与功率流的配电网静止同步补偿装置，该装置可对微电网中的单相无功功率进行补偿，确保电压总能维持在电网安全运行的范围内；文献[41-42]均采用了两组逆变装置并联连接的电能质量补偿器，有效地提高了MG以及ADN的电能质量。

4.4 其他综合效益分析

各独立可控的微电网单元运用集中—分散式控制及分布式控制等多种控制方式不仅能灵活调控自身的微电网系统^[43-44]，而且还能形成微电网群间的相互联系，并能与主动配电网控制中心实时联络，协调了各DG，改善了供电的可靠性，实现了需求侧的有效管理^[45]。微电网在主动配电网中的运用，可以实现对微电源的即插即用，并直接供给当地负荷，从而免除由于长距离输电而造成的功率损耗。与此同时，微电网的结构有利于减少网络拥堵、延缓投资扩建的需求，还可以达到热电联产的目的。大量可再生能源合理整合至微电网，提高了能源的利用率，进而减少了化石原

料的使用,降低了碳排放量,有利于推进我国实现绿色经济、可持续发展的战略目标^[46]。

5 结束语

随着全球环境的不断恶化,以及不可再生能源储备的逐年骤减,使得运用可再生能源发电的DG成为未来电力发展的必然选择,但随之带来了一系列诸如电力传输方向的不确定性增加、电网运行受扰和电力谐波污染激增等问题。微电网技术以其特有的灵活拓扑结构,加之有效的协调控制管理系统以及能量管理系统,使原来分散式接入主动配电网的DER得到了合理的规划整合,在确保电网安全、平稳和高效运行的同时,还保障了主动配电网经济、环境及社会效益。因此,研究如何将微电网技术更好地应用于ADN,对今后智能配电网的发展有着重要意义。

通过分析现有的研究成果,认为今后对微电网技术在ADN中应用的研究中应注重以下几个方向。首先应增强微电网技术在工程问题中的实际应用性,以起到其在提升电力能源利用率以及保障电网稳步运行方面的作用。其次,在现有微电网控制方法的基础上,需结合多种控制方式,提高对DER协调及管理的灵活度。最后,需综合考虑多方面因素,考虑微电网群并入ADN时的定容选址问题,确保电网在最优的运行模式下运行。

参考文献

- [1] 范明天,张祖平,苏傲雪,等.主动配电系统可行技术的研究[J].中国电机工程学报,2013,31(22):12-18.
- [2] Vasiljevska J, Pecas Lopes J A, Matos M A. Integrated micro-generation, load and energy storage control functionality under the multimicro-grid concept[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 95: 292-301.
- [3] Jayawardena A V, Meegahapola L G, Robinson D A, et al. Microgrid capability diagram: a tool for optimal grid-tied operation[J]. Renewable Energy, 2015, 74(2): 497-504.
- [4] 尤毅,刘东,钟清,等.主动配电网优化调度策略研究[J].电力系统自动化,2014(9):177-183.
- [5] Sauma E E, Yanine F F, Caballero F I, et al. Homeostatic control, smart metering and efficient energy supply and consumption criteria: a means to building more sustainable hybrid micro-generation systems[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 38(5): 235-258.
- [6] El-Hawary, Mohamed E. The smart grid – state-of-the-art and future trends[J]. Electric Power Components and Systems, 2014, 42(3-4): 239-250.
- [7] Pecas Lopes, Joao Abel, Madureira Andre Guimaraes, et al. A view of microgrids[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Energy and Environment, 2013, 2(1): 86-103.
- [8] 王成山,武震,李鹏.微电网关键技术研究[J].电工技术学报,2014,29(2):1-12.
- [9] Colak I, Kabalci E, Fulli G, et al. A survey on the contributions of power electronics to smart grid systems[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 47: 562-579.
- [10] 王鹤,李国庆.含多种分布式电源的微电网控制策略[J].电力自动化设备,2012,32(5):19-23.
- [11] 李鹏,窦鹏冲,李雨薇,等.微电网技术在主动配电网中的应用[J].电力自动化设备,2015,35(4):8-16.
- [12] Gouveia C, Rua D, Ribeiro F, et al. Experimental validation of smart distribution grids: development of a microgrid and electric mobility laboratory[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 78: 765-775.
- [13] 柯人观.微电网典型供电模式及微电源优化配置研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [14] 刘波,张焰,杨娜.改进的粒子群优化算法在分布式电源选址和定容中的应用[J].电工技术学报,2008,23(2):103-108.
- [15] 尤毅,刘东,钟清,等.主动配电网储能系统的多目标优化配置[J].电力系统自动化,2014,38

- (18): 46-52.
- [16] Florin Capitanescu, Luis F Ochoa, et al. Assessing the potential of network reconfiguration to improve distributed generation hosting capacity in active distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30 (1): 346-356.
- [17] 曾鸣, 彭丽霖, 王丽华, 等. 主动配电网下分布式能源系统双层双阶段调度优化模型 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36 (6): 108-115.
- [18] 魏炜, 竺笠, 罗凤章, 等. 主动配电网区域能源优化配置双层规划方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28 (5): 97-102.
- [19] Khalid M, Ahmadi A, Savkin A V, et al. Minimizing the energy cost for microgrids integrated with renewable energy resources and conventional generation using controlled battery energy storage [J]. Renewable Energy, 2016, 97: 646-655.
- [20] Nejad R Roofegari, Hakimi S M, Tafreshi S M Moghaddas. Smart virtual energy storage control strategy to cope with uncertainties and increase renewable energy penetration [J]. Journal of Energy Storage, 2016 (6): 87-94.
- [21] Kyriakarakos George, Dounis Anastasios I, Rozakis Stelios, et al. Polygeneration microgrid: a viable solution in remote areas for supplying power, potable water and hydrogen as transportation fuel [J]. Applied Energy, 2011, 88 (12): 4517-4526.
- [22] 羌丁建. 考虑微电网的配电网规划综合评价体系研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [23] Madureira A G, Pereira J C, Gil N J, et al. Advanced control and management functionalities for multi-microgrids [J]. European Transactions on Electrical Power, 2011, 21 (2): 1159-1177.
- [24] Arefifar S A, Mohamed A R I, El-Fouly T. Optimized multiple microgrid-based clustering of active distribution systems considering communication and control requirements [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 (2): 711-723.
- [25] Papadimitriou C N, Kleftakis V A, Hatziaargyriou N D. A novel islanding detection method for microgrids based on variable impedance insertion [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 121: 58-66.
- [26] Bidram Ali, Davoudi Ali, Lewis Frank L. A multiobjective distributed control framework for islanded AC microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10 (3): 1785-1798.
- [27] 孙鸣, 骆燕, 谭佳楠. 主动配电网运行模式对微电网可靠性的影响评估 [J]. 电力设备, 2015, 36 (1): 136-141.
- [28] 刘东, 陈云辉, 黄玉辉, 等. 主动配电网的分层能量管理与协调控制 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 32 (31): 5500-5506.
- [29] Ye Lin, Sun Haibo, Song Xuri, et al. Dynamic modeling of a hybrid wind/solar/hydro Micro-grid in EMT/ATP [J]. Renewable Energy, 2012, 39 (1): 96-106.
- [30] Hossain M J, Pota H R, Mahmud M A, et al. Robust control for power sharing in microgrids with low-inertia wind and PV generators [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6 (3): 1067-1077.
- [31] 于文鹏, 刘东, 余南华, 等. 主动配电网的局部自治区域供蓄能力指标及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (15): 44-50.
- [32] Schiffer Johannes, Ortega Romeo, Astolfi Alessandro, et al. Conditions for stability of droop-controlled inverter-based microgrids [J]. Automatica, 2014, 50 (10): 2457-2469.
- [33] Bie Zhaohong, Zhang Peng, Li Gengfeng, et al. Reliability evaluation of active distribution systems including microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27 (4): 2342-2350.
- [34] Arefifar S A, Mohamed A R I. DG mix, reactive sources and energy storage units for optimizing microgrid reliability and supply security [J]. IEEE

- Transactions on Smart Grid, 2014, 5 (4) : 1835-1844.
- [35] Guerrero Josep M, Vasquez Juan C, Matas Jose, et al. Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56 (3) : 726-736.
- [36] Costa Paulo Moises, Matos Manuel A. Assessing the contribution of microgrids to the reliability of distribution networks [J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79 (2) : 382-389.
- [37] Meng L, Zhao X, Tang F, et al. Distributed voltage unbalance compensation in islanded microgrids by using a dynamic consensus algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (1) : 827-838.
- [38] Kahrobaeian Alireza, Mohamed Yasser Abdel-Rady Ibrahim. Networked-based hybrid distributed power sharing and control for islanded microgrid systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30 (2) : 603-617.
- [39] Lee Tzung-Lin, Cheng Po-Tai. Design of a new cooperative harmonic filtering strategy for distributed generation interface converters in an islanding network [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22 (5) : 1919-1927.
- [40] Majumder Ritwik. Reactive power compensation in single-phase operation of microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (4) : 1403-1416.
- [41] Li Y W, Vilatlgamuwa D M, Loh P C. A grid-interfacing power quality compensator for three-phase three-wire micro-grid applications [C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2004, 3 (4) : 2011-2017.
- [42] Li Y, Vilatlgamuwa D M, Loh P C. Microgrid power quality enhancement using a three-phase fourwire grid-interfacing compensator [J]. Industry Applications Conference, 2004, 3 (6) : 1439-1446.
- [43] 陈云辉, 刘东, 凌万水, 等. 主动配电网协调控制的仿真测试平台 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (9) : 54-60.
- [44] 钟清, 张文峰, 周佳威, 等. 主动配电网分层分布控制策略及实现 [J]. 电网技术, 2015, 39 (6) : 1511-1517.
- [45] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网优化调度策略研究 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (9) : 177-183.
- [46] Fan M, Zhang Z, Su A. Cost-benefit analysis of integration DER into distribution network [C]. Cired Workshop-2012 (Integration of Renewables into the Distribution Grid), Lisbon, Portugal, 2012: 1-4.
- (收稿日期: 2016-12-01) EA

.....

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告