

微网经济调度研究综述

燕振刚¹ 张雪霞¹ 刘晋勇² 钟伟³ 马锡良³ 邹兴³

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031;

2. 国网四川省电力公司计量中心, 四川 成都 610045;

3. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要: 针对微网经济调度问题, 综合现有文献分别从微网经济调度模型的种类、微源不确定性因素的处理方法和多时间尺度调度进行论述。其中微网经济调度模型主要从静态模型和动态模型两方面论述; 不确定性因素处理方法分为确定性方法、模糊理论法和随机概率分布函数法; 多时间尺度经济调度主要分为基于短期预测技术的日前调度、基于超短期预测技术的日内调度和基于“秒”级的实时调度。最后, 对微网群集调度具有研究前景的方向做了展望。

关键词: 微网; 经济调度; 不确定性; 模糊理论; 概率分布函数; 多时间尺度

Abstract: Aiming at the economic dispatch problems of micro-grid and according to the existing literatures, the classification of micro-grid economic scheduling model, methods of dealing with uncertain factors and multiple time-scale dispatch in the micro-source are discussed. Wherein, the economic dispatch model of micro-grid can be divided into static model and dynamic model; the methods of dealing with uncertain factors is mainly include deterministic method, fuzzy tool and stochastic probability distribution function technique; multiple time-scale dispatch in the micro-source mainly focuses on day-ahead scheduling based on super short time forecasting technique, daily scheduling based on super short time forecasting technique and real time scheduling based on "second". Finally, through comprehensive analysis, some promising research directions of micro-grid cluster scheduling are included.

Key words: micro-grid; economic dispatch; uncertainty; fuzzy theory; probability distribution function; multiple time scales
中图分类号: TM727 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)02-0088-07

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.02.020

0 引言

面对能源短缺、环境污染等问题, 可再生能源的开发与利用成为重要的发展趋势。微网作为一种可以充分利用可再生能源的有效方式, 是将多种微源、储能装置和各类负荷集合在一起, 构成的一个可控系统。以孤岛和并网两种方式运行, 对节能、减小污染和充分利用分布式发电发挥着重要作用。为合理有效地利用各种微源, 微网经济调度是在满足一定约束条件和负荷需求下, 合理地调度微源和储能装置出力, 有效地减小运行成本和提高环境效益, 对微网优化运行起着重要的作用。

然而在微网经济调度问题的研究中, 影响经济运行结果的因素有很多, 归纳起来主要有以下几个方面: 1) 微网经济调度模型; 2) 求解这类优化问题算法; 3) 微源和负荷随机性; 4) 微源控制策略; 5) 不

同调度时间尺度等。这些因素的影响是微网经济调度研究的重要内容, 从系统本身的角度来讲, 微网模型、微源随机性处理方法和不同时间尺度3个因素影响比较关键, 下面从这3个方面来进行综述。

1 微网经济调度模型研究

微网经济调度模型是经济调度研究的核心内容, 对微网运行的合理性和可行性有着直接的影响。模型中包含的微源种类、约束条件的设定和考虑的目标函数都将对优化结果产生影响。经济调度根据是否考虑了不同时间断面之间的关联, 主要分为静态经济调度和动态经济调度。静态经济调度是忽略了各时间段之间的联系, 仅仅研究单一时间断面的优化方案; 动态经济调度为了加强不同时间段之间的关联性, 增加了可控微源的爬坡率约束。根据现有文献的研究成果详细论述两种经济调度模型的特

点。

1.1 静态经济调度模型

静态经济调度是基于当前时段负荷的需求以及微源的运行维护成本,在满足负荷和约束条件下,按照经济性最优的原则依次调度设备的启停和对应的输出功率。通常忽略各时间段之间的互相关联,独立对每一时间段进行优化。这类模型中可再生能源是以当前时刻风、光的有效出力作为确定值来处理的,忽略其随机性对经济运行的影响。文献[1]考虑了功率平衡约束、微源出力约束和电池的充放电深度,以运行维护成本最小为目标函数,建立了微网静态经济调度模型。文献[2]建立了微网静态多目标经济调度模型,模型中风、光和负荷都是作为确定量处理的。充分考虑了微源运行维护成本、环境成本、容量短缺和未满足的负荷等目标函数,多目标函数应用模糊评价函数进行求解。

针对微网同时承担冷、热、电3种负荷供应的情况,研究了微网冷热电联供经济调度模型。文献[3]提出了包含蓄能装置的微网冷热电联供模型,约束中充分考虑冷热电供需平衡、微源和蓄能装置的出力约束,以运行维护成本最小和环境效益最高为多目标函数。运行结果显示,蓄电池有利于运行的经济性,蓄热蓄冷装置降低了燃气轮机的运行成本。文献[4]研究了冷热电联供微网经济环保调度模型,增加了热备用约束和热平衡约束,将蓄电池虚拟放电和充电价格计入目标函数中,建立分阶段寻优目标函数。文献[5]在并网运行条件下,建立了冷热电联供系统的经济调度模型,研究发电成本、分时电价和电能交易对微源有功出力值的影响。

从微网静态经济调度模型的研究可以看出,模型中包含的随机性微源一般作为确定值处理;约束条件也相对单一,一般多以功率平衡约束和微源出力约束为主。目标函数一般是运行维护成本,环境效益成本,冷、热收益和电能交易成本中的一个目标或多个目标的组合形式。但是,静态模型忽略了影响经济运行结果的重要因素,如微源随机性、可靠性约束、爬坡率约束等;动态经济调度模型则更加全面地包含了这些因素,并讨论了其对运行结果的影响。

1.2 动态经济调度模型

这类模型有别于静态模型,考虑了可控微源爬

坡率约束和储能装置剩余容量约束等因素的影响。运行时间上具有更强的耦合性,为了加强时间耦合性,文献中关于储能装置剩余容量的约束,要求在一个调度周期前后容量保持一致。对微源的出力调度往往是以调度周期内综合效益最大化为目标进行的,目标函数更加多样,如增加了可靠性目标。约束条件增加了机组爬坡率约束、储能剩余容量约束、备用约束、潮流约束等。文献[6]研究了包含钠硫电池储能的微网动态经济调度模型,动态特性体现在调度周期始末电池能量状态保持不变,同时加入钠硫电池有效地平抑了可再生能源和负荷出力波动。文献[7]研究了孤岛系统经济调度模型,模型中增加了可控机组爬坡率约束、可靠性约束。针对可再生能源功率波动性问题,加入了失负荷风险指标和风光浪费指标,保证供电可靠性和可再生能源的高效利用。文献[8]研究了动态经济调度模型,考虑了功率平衡约束、微源出力约束和爬坡率约束,功率平衡约束的求解是采用潮流计算方法实现的,并且可以根据出力和负荷情况实时进行调节。文献[9]在并网运行条件下,研究计及分时电价冷热电联供微网动态经济调度模型,充分考虑机组启停、爬坡率约束和储能约束条件,但是该模型中忽略了可再生能源随机性的影响。针对这一忽略的问题,文献[10]在热电联产经济调度模型中引入热泵装置,不仅可以有效地消纳过剩的风电,减少弃风、减小储能的充放电次数和节约燃料,而且能够承担部分热负荷。文献[11]提出基于电热联合调度的区域并网型微网运行优化模型,该模型有效地克服了以往热电联供模型中电热之间相对独立和燃气轮机通常是完全跟踪热负荷而无法参与到电能调度中来的问题。这类模型综合考虑了启停及爬坡约束、出力约束和储能的充放电特性。

上述模型中的动态特性主要体现在约束上,如爬坡率约束、储能约束等条件。另外,考虑微源随机性的动态经济调度模型也是研究的热点。文献[12]为了克服各时间段之间联系不足的问题,充分考虑可再生能源随机性,钠硫电池的引入不仅可以平抑微源随机性波动,也可以加强不同时间断面之间的关联。文献[13]综合考虑了可再生能源的功率波动,负荷预测误差和机组启停故障等随机因素,

建立了动态调度的机会约束规划模型。模型中,系统可靠性约束通过一定置信水平下的旋转备用来体现,目标函数也是在一定置信水平下达到运行费用最小。文献[14]针对微网中可再生能源和负荷功率等随机性的影响,目标函数考虑制热收益,建立了基于机会约束规划的热电联产经济调度模型。约束条件的处理方式和目标函数的求解与文献[13]相同。文献[15]针对风、光出力随机性和热负荷波动性,建立了基于机会约束规划的动态经济调度模型,增加了热平衡约束、热电耦合约束和蓄热槽运行约束等,蓄热槽的作用是对热电联产“以热定电”约束解耦。

目前研究计及需求侧响应的微网动态经济调度模型有很多。如文献[16]对一个包含可再生能源的微网动态经济调度模型,考虑了分时电价差异,建立了基于不同电价的优化目标和约束条件,优化各时段内微源的出力。文献[17]建立了包含需求侧响应的微网经济调度模型,以需求侧负荷中的可转移负荷为研究对象,结合分时电价,对不同时段负荷转移进行分析,分析负荷转移对综合成本的影响。文献[18]在经济调度模型中考虑负荷满意度指标,将可中断负荷以可平移和不可平移两种状态进行研究,研究表明如果能够提高需求侧的管理,可以有效实现可再生能源的最大化利用和运行效益的最大化。文献[19]提出了一种考虑负荷中断的微网并网经济调度模型,通过引入反应中断功率和中断时间影响的浮动电价,来反映用户满意度的变化,并有效降低并网运行成本。

近年来,电动汽车普遍应用,计及电动汽车接入微网经济调度的研究吸引了学者们的兴趣。确定合理的电动汽车入网负荷特性曲线成为这类模型研究的关键点。文献[20]为了得到不同规模下电动汽车入网负荷特性曲线,对电动汽车的充放电行为应用蒙特卡洛法模拟,并研究接入电动汽车的微网多目标经济调度模型。文献[21]研究了电动汽车对微网经济运行的影响,同样是应用蒙特卡洛模拟法仿真电动汽车的充放电行为,在分时电价的机制下,以效益最大化为目标,讨论电动汽车无序充电和有序放电行为对微网运行经济性的影响。

综上所述,微网动态经济调度模型中增加可以

加强时间关联性的约束条件,考虑了可再生能源和负荷输出功率波动性的影响,讨论了需求侧响应和电动汽车入网而引入新的随机因素对微网经济调度的影响。其中,针对可再生能源随机性的影响,选择合理有效处理随机性的方法是十分有必要的,下面就现有文献进行归类总结。

2 微源随机性问题的处理方法

微网系统中风、光电本身的不确定性和预测误差带来的不确定性,在调度过程中往往会出现功率的盈余或缺失,会造成系统经济成本的增加和可靠性的降低。因此应用有效处理随机性的方法来解决这类不确定性的问题具有重要的意义,大致可以分为以下几种方法。

2.1 处理随机性问题的确定性方法

应用确定性方法处理可再生能源随机性问题,就是利用储能装置或响应速度快的可控负荷来补偿因为随机性造成的发电量的盈余和不足。如文献[12]提出了应用钠硫电池来平抑可再生能源出力的波动,有效地解决了功率波动对经济调度的影响。文献[22]的海岛微网经济调度模型,针对风能间歇性和随机性的特征,提出一种将海水抽蓄电站作为储能设备,配合风电,柴油机组构成微网为海岛供电。这种方案很好地解决了风电出力波动带来的影响,显著降低了供电成本,且环境污染小。文献[23]在含有风电场的经济调度模型中引入正、负旋转备用约束,以应对风电功率波动对调度结果带来的影响。随着研究的深入,利用需求侧响应的“源-荷”双侧调度来平衡微源随机性引发的波动越来越普遍。如文献[24]在调度模型中考虑价格型需求响应,研究表明需求响应可以提高风电的消纳能力。文献[25]在风电调度模型中计及实时电价的需求响应,分析了价格型响应负荷对间歇性能源接入的影响。文献[26]综合考虑“源-荷”特性,在调度模型中引入可中断负荷和分时电价这两种需求侧响应,以应对风电的反调峰特性和间歇性。

但是研究发现,这种方法是高运行成本和低可靠性为代价来解决问题的,而且误差较大,不能完全反映微源随机性对经济调度的影响。

2.2 处理随机性问题的模糊理论建模方法

应用模糊理论建模方法处理微源随机性问题,就是对负荷预测值和可再生能源输出功率的不确定性,采用模糊变量进行表示。文献[27]为解决风电不确定性问题,基于模糊理论采用梯形模糊数来表示每个优化时段的风电出力,建立了包含风电场的动态经济调度模糊模型。为更好地表达决策者的意愿,构建风电有功出力和总成本的隶属度函数和满意度指标,更好地适应风电输出功率的随机性。文献[28]也是通过对风电的模糊化建模,将风险引入目标函数中,求取风险成本和发电成本两个目标函数的最优解。同时文献[29]进一步证明模糊理论可以很好地解决含有不确定性风电的短期经济调度问题。但是模糊建模的关键在于准确确定模糊变量的隶属度函数,隶属度函数本身不具有对偶性,传统的模糊理论只能给出“可能性”的结论,很难给出“可信性”结论^[30]。为了解决这一问题,已有文献将模糊理论和可信度结合来处理风电的不确定性问题。文献[31]将间歇式微源出力和负荷用模糊参数表示,将确定性约束改为模糊参数下的约束,并基于可信性理论建立了含多模糊参数的模糊机会约束模型。文献[32]考虑风电预测误差的模糊性,结合可信性理论和模糊机会约束规划研究模糊置信水平下的动态经济调度问题。

2.3 处理随机性问题的概率分布函数方法

除了应用模糊理论解决不确定性问题,还包括基于随机概率分布的概率建模方法。概率分布函数的确定主要是基于风速、风电场出力和风电功率的预测误差来进行的。不同的概率分布模型将会对结果有着直接的影响。实际中风电预测比负荷预测更加困难,为了突出预测的不确定性,通常的做法是对预测误差建立概率分布模型。例如文献[33]考虑了风速预测结果,并且分别利用几种不同的随机分布函数来描述风速预测误差,阐述不同概率密度函数对优化结果的影响。文献[34]对风电误差进行统计,得到不同风电功率输出水平下的误差概率分布模型,预测误差在预测值附近一般服从正态分布。文献研究表明采用正态分布密度函数来描述预测误差的概率分布和实际误差分布函数较吻合。如文献[35]通过对风速预测来推导风电功率的概率分布

函数,风速预测误差采用正态分布函数描述,在经济调度中有着很好的表现。从建模的方法上可以看出,概率分布函数建模方法较模糊模型能够更加准确地描述风电功率的不确定性。

随机规划方法作为一种能够有效解决含有随机变量优化问题的方法,对考虑风电功率随机分布的经济调度问题有着广泛的应用。文献[36]针对风电的随机性的影响,在风速预测的基础上,应用随机规划理论建立了动态的经济调度模型。而机会约束规划可以有效地解决给定置信水平下具有随机变量的优化问题。文献[37]是应用机会约束规划来解决包含随机因素的经济调度模型。模型中的约束以概率的形式表示,风电的随机性问题得到了有效的解决。文献[38]建立了基于机会约束规划的孤岛模式微网经济调度模型,风光出力和负荷预测误差用随机变量表示,供电可靠性通过一定置信水平下的旋转备用表示。

但是随机规划方法是建立在已知随机变量的精确概率分布的基础之上的,实际中获得这类微源和负荷的概率分布比较困难。为了更好地解决随机性的问题,文献[39]采用区间数优化方法。一般对于变量的上下界很容易得到,利用区间描述变量的不确定性,基于区间序关系的转换方法^[40],将模型中不确定的区间优劣比较转化为确定性的数值大小比较。文献[41]针对可再生能源出力和负荷的不确定性,采用区间数对风速、光照强度以及负荷的变化进行描述,提出基于区间线性规划的微网经济调度模型。文献[42]考虑风电和负荷预测值不确定性,应用随机模糊变量描述风电功率,以区间形式表述负荷预测的不确定性,利用负荷不等式区间约束将遗传算法的初始寻优种群模糊化,建立了电力系统随机模糊多目标交易计划模型。其中,区间模糊数学和随机数学是处理不确定性信息的主要方法^[32]。

2.4 处理不确定性问题的场景分析法

在已知随机变量的概率分布情况下,一般可以通过抽样的方法来求解。文献[23]应用极大似然估计从风速样本中抽取数据,进而转化为风电功率,此种方法因抽样规模不同误差较大。文献[43]针对微网系统中风、光出力随机性的问题,采用点估计

法解决优化模型中随机变量的问题。文献[44]风电的随机性是通过场景模拟的方法来解决,采用拉丁超立方采样获得场景集,并利用基于概率距离的场景削减技术得到削减后的场景概率集,建立了考虑风电随机性的微网动态经济调度模型。

场景集分析方法是把具有连续概率分布的随机性向量离散成场景集合^[45],把随机优化问题转化为确定性问题。场景法可以明确体现不确定因素的概率特征,重点是研究场景的生成和场景集的削减两个方面。场景集的生成方法现有文献主要有以下几种抽样方法:采用蒙特卡洛法抽样得到大规模场景集^[46];采用基于自回归滑动平均模型,并考虑风速多时刻之间的耦合性^[47];通过风电预测功率谱密度来构造场景集,应用线性回归对历史数据进行分析^[48]。但是这类场景集的生成方法需要足够巨大的抽样规模,才能保证得到的场景集对原分布的近似。场景削减的方法包括快速向前选择法、向后削减法和场景树构造法等。但是这类方法通过遍历搜索手段来得到最优场景集,所以规模太大导致计算效率低。文献[45]提出一种处理风电功率随机性的模型,基于 Wasserstein 距离衡量指标^[49],得到风电功率分布的最优近似场景;并采用基于 $k - m$ -doids 的聚类方法得到削减后的场景模型,结果显示近似程度高,计算速度快。所以场景分析求解概率模型关键是选择合适的方法得到场景集合,并应用高效的削减技术得到具有代表性的概率场景。

3 微网多时间尺度经济调度

微网不同时间尺度经济调度本质上是减小运行误差,使微网系统的抗干扰能力增强,更好地消纳间歇性分布式电源。主要目的是平抑由于可再生微源和负荷的随机性带来的影响。目前关于多时间尺度的经济调度问题的研究主要从日前和日内两个时间尺度进行研究。

文献[50]的研究弥补了基于短期功率预测技术。单一的日前调度并不能完全反映可再生能源和负荷的预测误差以及非计划瞬时波动功率对能量管理系统的影响。结合基于超短期功率预测技术的日内调度,在不改变日前调度计划的前提下优化网

内的备用电源、储能装置的出力值,两者协同共同优化各微源的有功出力。文献[51]提出了一种基于模型预测控制的日内滚动优化校正策略,采用有限时间窗内的滚动优化代替传统单断面优化,提前感知未来一段时间内的可再生能源出力以及联络线计划的变化情况,对机组出力进行调整,并结合时域滚动和系统实时状态反馈,来消除随机性的影响。日前经济调度多以小时为时间尺度,但是由于微源和负荷的随机性使得预测误差较大,需要实时性强的超短期预测来对其修正。一个是以“时”为尺度,另一个是以“分”为尺度,两者的时间跨度较大。文献[52]针对这一问题,在超短期和实时调度之间加入基于准则的功率分配,快速消纳可再生能源和负荷的功率波动环节,减小联络线的功率波动。文献[53]提出时计划、调整计划及实时计划多时间尺度的协同优化控制方法。加入时间尺度为 15 min 的调整计划,以预测曲线为目标,动态修正微源发电计划,逐级平抑因误差造成 PCC 功率波动;在以 1 min 为时间尺度的实时计划中,利用储能装置快速跟踪负荷的能力,平抑因为突发事件产生的波动。因此,研究微网动态经济调度不能仅仅依靠日前经济调度,更需要多时间尺度协调优化。

4 展望

目前的研究主要集中在单一微网经济调度问题。但是单一微网的工作容量有限,抗干扰能力较弱,运行工作过程中容易出现分布式电源出力突变,负荷的接入或脱离等问题,运行可靠性较差。近年来,微网群集经济调度作为一种新的组网方式,通过子微网及分布式电源之间的能量调度和互补,可以进一步提高分布式电源的渗透率。但是目前国内关于微网群集调度的研究还比较少,未来关于微网群集调度的研究,在微网群的组网方式、子网间的协调控制和微网群能量管理等方面值得做一些深入的研究。

参考文献

- [1] 郭佳欢. 微网经济运行优化的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [2] 周晓燕, 刘天琪, 沈浩东, 等. 含多种分布式电源的微

- 电网经济调度研究[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(1): 5-8.
- [3] 戚建文, 任建文, 渠卫东, 等. 冷热电联供微网环保经济调度研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(25): 90-97.
- [4] 宋晓英, 王艳松. 基于协同进化遗传算法的微网经济环保调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 85-89.
- [5] 牛铭, 黄伟, 郭佳欢, 等. 微网并网时的经济运行研究[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 38-42.
- [6] 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 等. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 7-14.
- [7] 罗毅, 刘明亮. 计及风险备用约束的孤网系统环保经济调度[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2705-2711.
- [8] 宁阳天, 李相俊, 麻秀范, 等. 基于改进粒子群算法的微网动态经济调度[J]. 电力建设, 2014, 35(6): 26-30.
- [9] 吴雄, 王秀丽, 别朝红, 等. 含热电联供系统的微网经济运行研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 1-6.
- [10] 郭宇航, 胡博, 万凌云, 等. 含热泵的热电联产型微电网短期最优经济运行[J]. 电力自动化设备, 2015, 39(14): 16-23.
- [11] 李正茂, 张峰, 梁军, 等. 含电热联供系统的微电网运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3569-3577.
- [12] 黄伟, 黄婷, 周欢, 等. 基于改进微分进化算法的微电网动态经济优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 211-217.
- [13] 刘小平, 丁明, 张颖媛, 等. 微网系统的动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 77-84.
- [14] 肖青, 陈洁, 杨秀, 等. 含多种分布式电源的微网动态经济调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4): 22-29.
- [15] 刘方, 杨秀, 黄海涛, 等. 含热电联产热电解耦运行方式下的微网能量综合优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(1): 51-58.
- [16] 刘方, 杨秀. 分时电价下考虑预测偏差的微网经济运行[J]. 陕西电力, 2016, 44(4): 65-71.
- [17] 邵靖珂, 汪泓, 谭阳红, 等. 计及需求侧相应的微网经济优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(10): 31-37.
- [18] 曾君, 徐冬冬, 刘俊峰, 等. 考虑负荷满意度的微电网运行多目标优化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3325-3335.
- [19] 赵猛, 丁晓群, 刘远龙, 等. 考虑负荷中断的微网并网经济调度[J]. 电力建设, 2016, 37(4): 57-63.
- [20] 吴红斌, 侯小凡, 赵波, 等. 计及可入网电动汽车的微网系统经济调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 77-84.
- [21] 陈深, 毛晓明, 林泽坤. 电动汽车对微网优化运行的影响分析[J]. 电力学报, 2014, 29(6): 473-479.
- [22] 范刘洋, 汪可友, 李国杰, 等. 含有海水抽蓄电站的海岛微网优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 381-386.
- [23] 周玮, 彭昱, 孙辉, 等. 含风电场的电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 13-18.
- [24] Le Xie, Joo J Y, Ilic M D. Integration of Intermittent Resources with Price: Responsive Loads [C] // 41st North American Power Symposium In. USA: IEEE Computer Society, 2009: 1-6.
- [25] Hamidi V, Li F, Robinson F. The Effect of Responsive Demand in Domestic Sector on Power System Operation in the Networks with High Penetration of Renewables [C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, USA, 2008: 1-8.
- [26] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 等. 智能电网下计及用户侧互动的发电日前调度计划模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 30-38.
- [27] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电场电力系统经济调度的模糊建模及优化算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 22-26.
- [28] Wang L F, Singh C. Tradeoff between Risk and Cost in Economic Dispatch Including Wind Power Penetration Using Particle Swarm Optimization [C] // International Conference on Power System Technology, Chongqing, China, 2006: 1-7.
- [29] Hong Y Y, Li C T. Short-term Real-power Scheduling Considering Fuzzy Factors in an Autonomous System Using Genetic Algorithms [J]. The Institution of Engineering and Technology, 2006, 153(6): 684-692.
- [30] 黄国栋, 李伟刚, 李振斌. 大规模风电接入的电网发电调度研究综述[J]. 电测与仪表, 2015, 52(9): 1-6.
- [31] 熊虎, 向铁元, 陈红坤, 等. 含大规模间歇式电源的模糊机会约束机组组合研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 36-44.
- [32] 艾欣, 刘晓. 基于可信性理论的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 12-18.

[33] JABR R A , Pal B C. Intermittent Wind Generation in Optimal Power Flow Dispatching [J]. IET Generation , Transmission and Distribution , 2009 , 3(1) : 66 - 74.

[34] 孟祥星 , 王宏. 大规模风电并网条件下的电力系统调度[J]. 东北电力大学学报 2009 29(1) : 1 - 7.

[35] Siahkali , Vakilian , M. Stochastic Unit Commitment of Wind Farms Integrated in Power System [J]. Electric Power Systems Research , 2010 , 80 (9) : 1006 - 1017.

[36] 孙元章 , 吴俊 , 李国杰 , 等. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报 , 2009 , 29(4) : 41 - 47.

[37] 江岳文 , 陈冲 , 温步瀛. 基于随机模拟粒子群算法的含风电场电力系统经济调度[J]. 电工电能新技术 , 2007 26(3) : 37 - 43.

[38] 任建文 , 渠卫东. 基于机会约束规划的孤岛模式下微网动态经济调度[J]. 电力自动化设备 2016 36(3) : 73 - 80.

[39] 朱祥祥 , 黄崇鑫 , 岳东. 等. 基于区间不确定性的微网有功 - 无功联合优化调度[J]. 电力系统自动化 , 2016 40(15) : 39 - 47.

[40] Liu Y , Jiang C , Shen J et al. Coordination of Hydro Units with Wind Power Generation Using Interval Optimization [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy , 2015 6(2) : 443 - 453.

[41] 王守相 , 王栋 , 韩亮. 考虑不确定的微网日前经济优化调度区间线性规划方法[J]. 电力系统自动化 , 2014 38(24) : 5 - 13.

[42] 马瑞 , 康仁 , 姜飞 , 等. 考虑风电随机模糊不确定性的电力系统多目标优化调度计划研究[J]. 电力系统保护与控制 2013 41 (1) : 150 - 156.

[43] 李武强 , 余涛 , 林建泉 , 等. 考虑随机性的微电网环保经济运行优化[J]. 电力系统及其自动化学报 2015 , 27(3) : 81 - 87.

[44] 戴仲覆 , 陈涛 , 于文俊. 一种在微网动态经济调度中考虑风电随机性的方法[J]. 发电与空调 2013 34 (5) : 1 - 5.

[45] 王群 , 董文略 , 杨莉. 基于 Wasserstein 距离和改进 K - medoids 聚类的风电/光伏经典场景集生成算法[J]. 中国电机工程学报 2015 35(11) : 2654 - 2662.

[46] 王蓓蓓 , 刘小聪 , 李扬. 面向大容量风电接入考虑用户侧互动的系统日前调度和运行模拟研究[J]. 中国电机工程学报 2013 33(22) : 35 - 44.

[47] Zhang Jianyong , Wang Cong. Application of ARMA Model in Ultra - short Term Prediction of Wind Power [C]//2013 International Conference on Computer Sciences and Applications (CSA) , Wuhan , China: Hubei University of Technology 2013: 361 - 364.

[48] Due hee L , Ross B. Future Wind Power Scenario Synthesis through Power Spectral Density Analysis [J]. IEEE Transactions on Smart Grid 2014 5(1) : 490 - 500.

[49] 黎静华 , 韦化 , 莫东. 含风电场最优潮流的 Wait - and - See 模型与最优渐近场景分析[J]. 中国电机工程学报 2012 32(22) : 15 - 23.

[50] 郭思琪 , 袁越 , 张新松. 等. 多时间尺度协调控制的独立微网能量管理策略[J]. 电工技术学报 2014 29 (2) : 122 - 128.

[51] 肖浩 , 裴玮 , 孔力. 基于模型预测控制的微电网多时间尺度协调优化调度[J]. 电力系统自动化 2016 40 (18) : 7 - 16.

[52] 窦晓波 , 徐恣慧 , 董建达 , 等. 微电网改进多时间尺度能量管理模型[J]. 电力系统自动化 2016 40(9) : 48 - 56.

[53] 茆美琴 , 张永宁 , 王杨洋 , 等. 削峰填谷策略下微电网多时间尺度能量优化[J]. 南方电网技术 2016 , 10 (8) : 23 - 32.

作者简介:
燕振刚(1991) , 硕士研究生 , 研究方向为微电网经济调度。
(收稿日期: 2016 - 11 - 13)

(上接第87页)

[9] 张思寒. 避雷器配置方式对 220 kV 同塔多回输电线路防雷效果研究[J]. 电瓷避雷器 2015(2) : 82 - 86.

[10] 彭晓亮 , 陈坤 , 刘新 , 等. ±500 kV 直流线路避雷器在江城线的应用[J]. 电瓷避雷器 , 2014(4) : 111 - 115.

[11] 苏杰 , 曹炯 , 姜文东 , 等. 220 kV/110 kV 同塔四回输电线路双回同时闪络耐雷性能及防治[J]. 电瓷避雷器 2013(5) : 90 - 96.

[12] 詹花茂 , 李成榕 , 陈秀娟 , 等. 线路避雷器安装方案及效果分析[J]. 电瓷避雷器 2004(3) : 32 - 35.

作者简介:
彭锦超(1983) , 工程师 , 研究方向为电力工程设计。
(收稿日期: 2016 - 11 - 07)