

基于系统可靠性的主动配电网置信容量评估

陈 谦¹ 张文涛¹ 王思露² 张景瑞² 张 伟³

(1. 国网四川省电力公司经济技术研究院 四川 成都 610041;

2. 厦门大学仪器与电气系 福建 厦门 361005; 3. 积成电子股份有限公司 山东 济南 250100)

摘 要: 评估主动配电网的置信容量, 可以充分利用新能源, 为主动配电网的优化配置提供有效参考。以新增电源的有效载荷能力表征主动配电网的置信容量, 建立基于等可靠性指标的评估模型。在蒙特卡洛仿真基础上, 考虑网络中线路的故障情况, 对各时刻网络分类计算。采用基于负荷相对增长比例的方法计算负荷调整步长, 最后利用中点分割迭代法求解。IEEE 33 节点系统的仿真计算验证了所提方法的可行性和有效性。仿真时改变分布式电源参数和可靠性指标, 发现风机额定功率对置信容量的结算结果影响较大。

关键词: 主动配电网; 置信容量; 分布式电源; 可靠性

中图分类号: TM72 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)02-0030-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.02.007

Credible Capacity Evaluation of Active Distribution Network Based on System Reliability

Chen Qian¹, Zhang Wentao¹, Wang Silu², Zhang Jingrui², Zhang Wei³

(1. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Department of Instrumental and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China; 3. Jicheng Electronics Corporation, Jinan 250100, Shandong, China)

Abstract: Credible capacity evaluation of active distribution network (ADN) can make full use of distributed generations (DGs), which provides valid reference for the optimal allocation of ADN. The credible capacity of ADN is defined as the pay-load capacity of DGs, and the evaluation model is established based on reliability indexes. Different situation with considering the fault of lines are classified and calculated on the basis of Monte Carlo simulation. The load adjustment steps are calculated by the method which is based on relative growth of loads. Finally, the credible capacity of ADN is calculated using the mid-point segmentation iteration method. The feasibility and validity of the proposed method are verified in IEEE 33 nodes system. In the simulation it can find that the rated power of wind powers has a greater influence on the calculation results of credible capacity when DGs parameters and reliability indexes are changed.

Key words: active distribution network; credible capacity; distributed generations; reliability

0 引 言

电源的置信容量(容量可信度)反映电源的容量价值即可被信用的容量,可以用来衡量分布式电源对电力系统充裕度所做的贡献^[1-2]。由于分布式电源的不稳定性和随机性,通常不考虑其容量价值^[3]。随着分布式能源的快速发展,将会有大量分布式电源接入主动配电网,如果仍不考虑其容量价值,可能会造成大量的资源浪费。为高效利用能源,

提高系统的稳定性、可靠性和安全性,对分布式电源的置信容量评估是十分必要的。

国内外对分布式电源的置信容量展开了相关研究。文献[4-5]总结了基本的分布式电源置信容量计算方法。文献[6]利用割线法和二分法相结合的混合算法来计算光伏/风机混合系统的置信容量。文献[7]利用基于动态潮流的方法计算主动配电网中间歇电源的置信容量。文献[3, 8-12]针对光伏发电置信容量进行研究。文献[8]针对光伏发电的随机性和间歇性,提出一种考虑太阳辐射时变性和

功率相关性的方法计算光伏电站群的置信容量。文献[3, 12]利用粒子群优化算法计算光伏电站的置信容量,并且考虑了不同天气因素的置信容量。文献[13-19]基于风电的容量可信度进行相关研究。文献[13]建立了多状态风电机组出力模型,提出了最大因子步长法,兼顾风电置信容量计算的准确性和计算速度。文献[15]考虑了空间中多个风电场之间的出力相关性,构建了多风电场出力模型,在此基础上计算多风电场的出力模型。

上述关于分布式电源置信容量的研究,多是对单种类型间歇能源置信容量的研究以及不同研究条件对置信容量的影响。目前对混合分布式电源的置信容量和主动配电网置信容量的研究相对较少。在此基础上提出了基于可靠性的主动配电网综合资源置信容量的评估算法及实施流程。计算可靠性指标时考虑网络中线路的故障情况,对网络进行分类计算。在蒙特卡洛仿真基础上,利用中点分割迭代法同步调整所有负荷节点的负荷。考虑负荷节点处负荷变化趋势,利用基于负荷相对增长比例的方法计算负荷调整步长。利用IEEE 33节点系统进行算例仿真,并且基于IEEE 33节点系统研究了不同的分布式电源参数和不同可靠性指标对置信容量结果的影响。

1 置信容量评估模型

1.1 置信容量计算方法

解析法和仿真法是计算电源置信容量的主要方法^[3]。解析法是推导出一个解析式来计算系统置信容量。对于主动配电网而言,系统的变量很多且是非线性的,还会受到分布式电源波动性的影响,构建一个合理的解析式非常复杂,所以一般不采用解析法计算置信容量。目前基本上都是运用仿真法来计算系统置信容量^[3, 5, 16]。

现有置信容量的表征定义可大致分为以下4类^[11, 17]:

- 1) 等效可靠容量 (equivalent firm capacity, EFC) 是指在等可靠性水平下,分布式电源可以替代100%可靠的常规机组的容量;
- 2) 等效常规机组容量 (equivalent convectional capacity, ECC) 是指在等可靠性水平下,分布式电源可以替代考虑停运率的常规机组的容量;
- 3) 新增电源有效载荷能力 (equivalent load car-

rying, ELCC) 是指在等可靠性水平下,分布式电源可以额外满足的负荷量;

- 4) 一定置信度下保证出力 (guaranteed capacity, GC) 是指在一定置信度水平下,主动配电网发电侧可用电量。

对于这4种定义,EFC、ECC、ELCC是从系统可靠性角度出发,GC是从发电侧不确定性角度出发。ECC的计算结果会受到常规机组可靠性参数的影响,GC的计算结果取决于人为设定的保证率参数,参数的选取对ECC和GC的计算结果影响很大。EFC和ELCC两种定义能够保证较为一致的计算结果,因此研究中多采用这两种方法,其中基于ELCC的方法对于大规模新能源发电的置信容量计算效率更高^[13]。主动配电网中分布式电源渗透率增加可以更好地满足负荷需求,因此这里选用基于ELCC的方法计算置信容量。

1.2 评估模型

在主动配电网中,当系统中增加新的电源时,一般系统的可靠性会增加。对于主动配电网,ELCC就是指调整系统的负荷水平,当系统可靠性水平与原始系统(不含分布式电源)一致时负荷的改变量。用负荷水平的改变量来表征主动配电网的置信容量,具体可以表现为

$$R = F(C, L) = F(C + W, L + \Delta L) \quad (1)$$

式中: R 为可靠性指标; F 为可靠性估算函数; C 和 W 分别为外电网可提供的电量和加入新能源后新增加的装机容量; L 和 ΔL 分别为系统的初始负荷和负荷改变量。由ELCC的定义可得系统的置信容量 C_N 为

$$C_N = \Delta L \quad (2)$$

2 序贯蒙特卡洛仿真

为简化计算,对于系统中的元件,只考虑正常运行和故障停运两种状态。抽样的元件考虑了风机、光伏、蓄电池以及线路。一般来说,系统元件的正常运行持续时间和故障修复时间均服从指数分布,它们的概率密度函数为

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (3)$$

$$g(t) = \mu e^{-\mu t} \quad (4)$$

式中: λ 为故障率; μ 为修复率。

对概率密度函数求积分得到概率与时间的关

系,然后通过产生 $[0, 1]$ 之间随机数的方式,反过来抽样正常运行持续时间 T_{TF} 和故障修复时间 T_{TR} ,其抽样公式为

$$T_{TF} = -\frac{1}{\lambda} \ln R_1 \quad (5)$$

$$T_{TR} = -\frac{1}{\mu} \ln R_2 \quad (6)$$

式中 R_1, R_2 为 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数。对正常运行时间和故障修复时间进行如图1所示的状态持续时间抽样,即可得到周期内各时刻系统元件的状态。

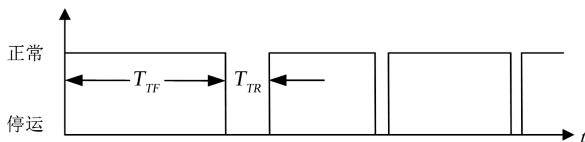


图1 二状态抽样

序贯蒙特卡洛仿真法是按照时间顺序对元件进行模拟,仿真时保留了元件的时序性^[14]。对于主动配电网来说,首先对各元件进行状态抽样,得到各元件的状态,再结合风机、光伏的出力模型^[1, 12, 20]和负荷模型^[21],即可得到主动配电网各时刻网络状况,包括分布式电源的出力、负荷需求值以及线路状况。

3 可靠性指标计算

3.1 可靠性指标

主动配电网的置信容量计算是在系统可靠性的基础上进行的,此处选择电量不足期望(expected energy not supplied, EENS)和孤岛电力不足期望(expected demand not supplied when being island, EDNSI)作为主动配电网可靠性指标,具体如下:

$$EENS = \sum_{t=1}^T (C(t) \times P(t)) \quad (7)$$

$$EDNSI = \sum_{t=1}^T (C_g(t) \times P_g(t)) \quad (8)$$

式中: T 为计算周期; $C(t)$ 和 $C_g(t)$ 分别为正常运行时和孤岛运行时 t 时刻系统负荷削减量; $P(t)$ 和 $P_g(t)$ 分别为正常和孤岛运行时电量不足发生的概率。

3.2 线路故障时的计算

当出现故障时,系统网络可能解列为多个小网络。根据解列的小网络情况,将可能出现的情况进行分类,分别设计相应的处理办法。小网络分类及处理办法如下:

1) 如果小网络内部不含任何供电电源,则认为

该网络内部的负荷全部为缺供电量;

2) 如果小网络与外电网相连接,则将与外电网相连的节点作为平衡节点,潮流计算后得出各负荷点实际供电量,与需求电量相比较统计电量不足值;

3) 如果小网络没有与外电网相连,但网络内部包含PV节点,则选取其中一个PV节点作为临时平衡节点进行潮流计算,然后比较负荷点实际值与需求值来统计电量不足值。

根据不同的网络情况分类计算相应的可靠性指标值。

4 置信容量评估步骤及流程

4.1 负荷调整步长

考虑到网络现有负荷分布状况会影响负荷调整计算的准确性,这里采用简单的基于负荷相对增长比例的方法计算负荷调整步长^[22]。

周期内负荷点 i 处的相对增长比例为

$$r_i = \frac{P_{Li}^{\max}}{P_{Li}^{\min}} \quad (P_{Li}^{\min} \neq 0) \quad (9)$$

式中 P_{Li}^{\max} 和 P_{Li}^{\min} 分别为周期内负荷点 i 处负荷的最大值和最小值,当周期内负荷点 i 处最小值为0时,就取第二最小值作为 P_{Li}^{\min} 进行计算。

因此,配电网中基于相对增长比例的负荷调整步长可以表示为

$$h_i = P_{Li}(0) \times r_i \% \quad (10)$$

式中 $P_{Li}(0)$ 为负荷点 i 处负荷初始值。当负荷增长比例较小时,求出的调整步长也会较小,在实际应用中可以使所有负荷点的调整步长扩大适当倍数来加快计算速度。

4.2 中点分割迭代法

关于ELCC的计算,实质上是一个一维搜索过程,传统的中点分割迭代法、弦截法即可满足要求。当负荷调整步长一定时,用中点分割迭代法会更加简单,并且其算法简单容易实现,因此这里选择中点分割迭代法求解。

下面对中点分割迭代法求解新增负荷的迭代原理进行简单说明。如图2所示,A点为系统可靠性指标值 R ,G点为原始系统可靠性指标值 R_0 。从A点开始根据负荷调整步长来调整负荷,此处以增长负荷为例,减小负荷方法相同。每调整一次负荷计算一次可靠性指标值,直至超过 R_0 ,此时可以确定

目标解位于最后一次调整后的负荷值和前一次负荷值之间,即图中 C 点和 D 点之间。判断是否满足精度,即图中 GD 距离小于 e (给定的一个较小值),若满足则终止迭代,若不满足则更新负荷增长步长为二分之一,从 C 点开始重复之前的搜索步骤,如此不断迭代,逐步逼近目标点 F。F 点负荷水平与 A 点负荷水平的差值 ΔL 即为主动配电网的置信容量。

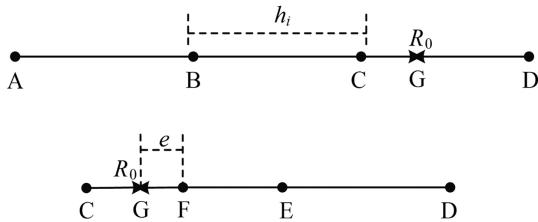


图 2 中点分割迭代法原理

4.3 评估步骤与流程

选定了可靠性指标和搜索方法,主动配电网置信容量的评估流程如图 3 所示,具体的步骤如下:

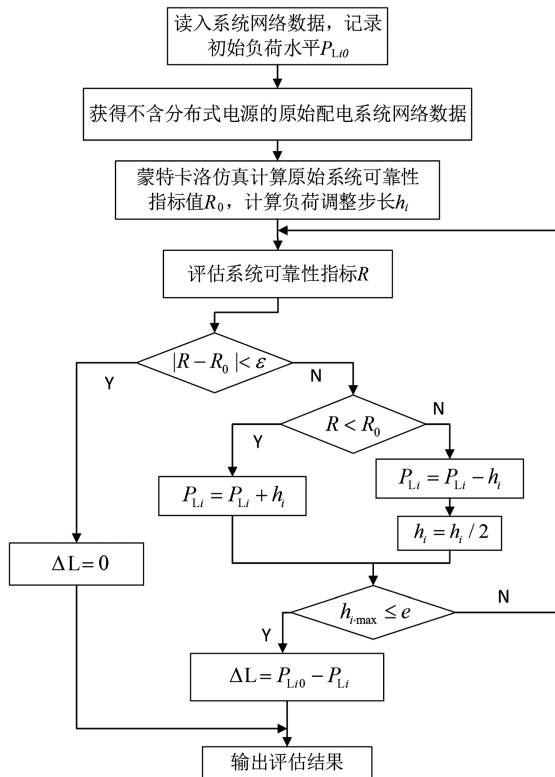


图 3 主动配电网置信容量评估流程

1) 输入主动配电网的网络数据,调整蓄电池获得蓄电池状态,计算负荷调整步长 h_i ;

2) 修改网络数据,去掉分布式电源数据,保留负荷信息,得到基于该主动配电网的原始系统数据,利用序贯蒙特卡洛模拟法对原始系统的可靠性进行评估,得到可靠性指标值 R_0 ;

3) 利用序贯蒙特卡洛法得出各时刻系统网络状况,计算主动配电网的可靠性指标值 R ;

4) 利用中点分割迭代法调整负荷水平,不断迭代调整,当负荷调整步长小于给定精度 ϵ 时,此时的负荷水平与初始负荷水平的差值 ΔL 即为主动配电网的置信容量。

5 案例分析

5.1 算例简介

以 IEEE 33 节点系统作为置信容量评估对象,其网络如图 4 所示,节点 6、13、24、30 为 PV 节点,节点 1 是平衡节点与外电网相连,其他节点都是 PQ 节点。为了简化模型,假设只有 PQ 节点带负荷,节点负荷最大值与各支路参数参考 IEEE 33 节点系统参数^[23]。假设各节点电压幅值标幺值和相角初始值分别为 1 和 0,电压上、下限标幺值分别为 1.05 和 0.95,基准功率和基准电压分别为 10 MVA 和 12.66 kV,各支路线路功率都为 7000 kW,各元件故障率和修复率分别为 0.1% 和 60%。

针对分布式电源参数,设计了 5 种研究方案,表 1 列出了各方案系统中分布式电源的接入情况。

依据系统网络参数,各时刻分布式电源出力及各节点负荷需求值由蒙特卡洛仿真得出。

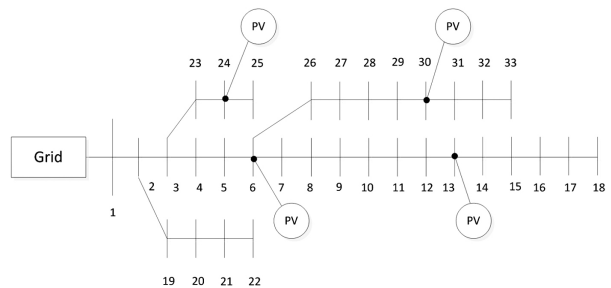


图 4 仿真算例的系统网络

5.2 计算结果

以方案 1 为研究对象,选择第 1 个小时的负荷值为初始值,计算负荷增长步长 h_i ,表 2 列出了各负荷节点负荷调整步长的计算值。计算出的负荷调整步长较小,根据光伏板面积和风机额定功率,将所有调整步长都扩大 40 倍来缩短计算时间。

假设大电网供电上限 P_{0max} 为 5000 kW,计算周期为 8760 h。由于分布式电源出力是根据一定概率密度函数仿真出来的,并且还存在着故障率和修复率,每次计算时仿真所得值不会完全一样。这里以

表1 各研究方案分布式电源参数

参数	节点编号	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
光伏板面积 /m ²	6	200	300	180	300	300
	13	-	300	200	300	300
	24	200	350	170	350	350
	30	300	300	200	300	300
	总计	700	1250	750	1250	1250
风机额定功率 /kW	6	100	400	400	200	400
	13	100	-	-	-	-
	24	300	400	400	300	400
	30	320	450	450	250	450
	总计	820	1250	1250	750	1250
蓄电池容量 /kWh	6	90	100	100	100	100
	13	50	150	150	150	90
	24	180	130	130	130	100
	30	150	150	150	150	80
	总计	470	530	530	530	370

表2 负荷调整步长

节点	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17
调整步长	1.585	1.427	1.902	0.951	3.171	3.171	0.951	0.951	0.713	0.951	1.902	0.951	0.951	0.951
节点	18	19	20	21	22	23	25	26	27	28	29	31	32	33
调整步长	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	1.427	6.658	0.951	0.951	0.951	1.902	2.378	3.329	0.951

表3 方案1置信容量计算结果

仿真计算参数	仿真1	仿真2	仿真3	仿真4	仿真5	仿真6
迭代次数	21	21	22	19	17	16
R_0	27.767 8	25.978 9	28.201 1	31.175 7	26.851 8	27.036 9
R	27.761 3	25.973 1	28.198 2	31.171 1	26.851 3	27.031 7
总计 /kW	1 434.48	1 472.25	1 429.39	1 419.23	1 515.10	1 418.55
平均值 /kW	43.47	44.61	43.31	43.00	45.91	42.99

EENS 作为可靠性指标列出了6次计算结果,如表3所示。图5展示了多次计算后所得的系统各节点负荷改变值。由表3可以看出,迭代20次左右可以得到结果,调整负荷后的 R 和 R_0 基本一致。图5中多次计算所得的负荷改变量柱状图基本一致,说明多次计算求得的置信容量相接近。实际应用中应该多次求解,取其最小值。

5.3 分布式电源参数的影响

以方案2至方案5为计算对象,各方案的分布式电源参数不同,以EENS作为可靠性指标分析不同分布式电源参数下主动配电网的置信容量。表4列出了各方案的置信容量计算结果。

由表4可以看出,迭代16次左右可以得到结果,方案2、方案3和方案5所计算出来的结果相近,而方案4的结果明显减小。相较方案2,方案3减小了光伏板面积,方案4减小了风机额定功率,方

表4 方案2至方案5置信容量计算结果

计算参数	方案2	方案3	方案4	方案5
迭代次数	15	15	16	17
R_0	28.922	26.609	25.922	25.542
R	28.815	26.604	25.916	25.541
总计 /kW	1 953.7	1 892.0	1 150.5	1 923.3
平均值 /kW	59.20	57.33	34.86	58.28

案5减小了蓄电池的容量。可以看出在该实验环境下,蓄电池容量和光伏板面积对系统置信容量的计算影响不大,风机额定功率对置信容量的计算影响较大,较大的额定功率会获得较大的置信容量值。

5.4 可靠性指标的影响

以方案1为计算对象,在不同可靠性评价指标条件下进行计算,分析不同可靠性指标对置信容量的影响。每个可靠性指标分别进行2次仿真计算,表5列出了相应的结果。

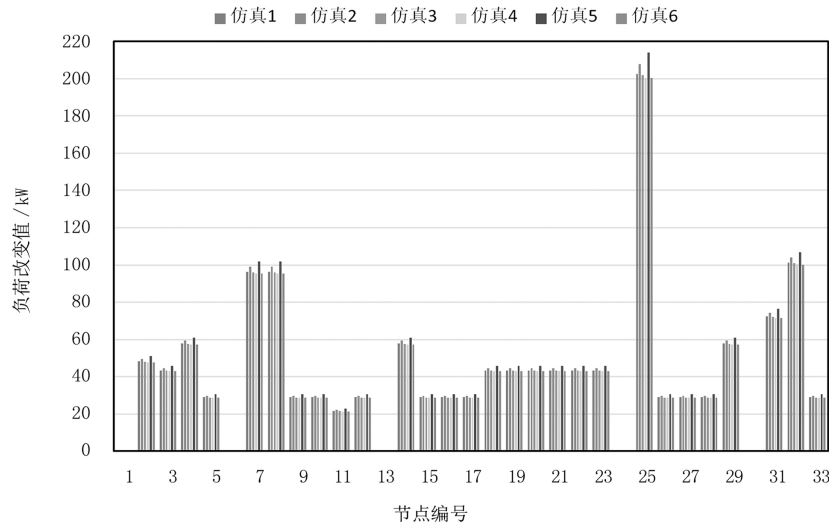


图5 多次计算各节点的负荷改变值

表5 不同可靠性指标下的计算结果

计算参数	EENS		EDNSI	
	第1次	第2次	第1次	第2次
迭代次数	19	21	20	18
R_0	24.893	27.768	34.805	32.578
R	24.889	27.761	34.780	32.577
总计 /kW	1 408.3	1 434.5	1 398.3	1 484.9
平均值 /kW	42.68	43.47	42.37	44.99

由表5可以看出,两个指标条件下都是迭代20次左右即可以得到结果,并且计算出来的置信容量接近。两个可靠性指标的计算方法类似,EENS是针对整个系统所有情况进行计算的,EDNSI是针对故障时孤岛网络的缺供电量,当 P_{0max} 设置较大时,两者计算结果相近,因此所得置信容量结果相差不大;当 P_{0max} 较小时,两者就可能有明显差异。实际应用中可以进行多次计算,取最小结果表征系统的置信容量。

6 结 语

在现有关于新能源可靠性和置信容量研究的基础上,采用等可靠性水平下主动配电网与原始系统可供应负荷改变量来评估其置信容量。用蒙特卡罗仿真法计算系统可靠性指标,计算时根据电源情况对网络进行分类。采用基于负荷相对增长比例的方法计算所有负荷点的调整步长,并且利用中点分割迭代法搜索等可靠性水平下负荷的改变量,以此表征主动配电网的置信容量。

所提方法在IEEE 33节点系统进行了示范和验证,并且计算了不同分布式电源参数和不同可靠性

指标条件下的置信容量。发现在实验环境下风机额定功率对置信容量计算结果的影响更大,较大的额定功率会获得较大的置信容量值,光伏板面积、蓄电池容量和较大外电网功率限制下可靠性指标改变对置信容量评估结果影响较小。在后续研究中,可以考虑增加供电不足概率、供电质量等可靠性指标进行计算,并且可以改变外电网供电上限,研究其对置信容量结果的影响。

参考文献

- [1] 王秀丽,武泽辰,曲翀. 光伏发电系统可靠性分析及其置信容量计算[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 15-21.
- [2] 蔡霖霖,徐青山,王旭东. 基于加速时序蒙特卡洛法的风电场置信容量评估[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 86-93.
- [3] 方鑫,郭强,张东霞,等. 考虑天气不确定性的光伏电站置信容量评估[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 27-32.
- [4] 葛少云,王世举,路志英,等. 基于分布式电源置信容量评估的变电站规划方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 61-67.
- [5] 隋国富. 大规模新能源发电容量可信度分析[J]. 科技创新导报, 2015(24): 48-49.
- [6] Zhang P, Zhang W, Jia C, et al. Credible Capacity of Wind/PV Hybrid System Research Based on Hybrid Algorithm[C]. 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT 2015) 2015: 2068-2073.

(下转第67页)

[6] Alessandra Parisio ,Carmen Del Vecchio ,Alfredo Vaccaro. A Robust Optimization Approach to Energy Hub Management [J]. International Journal of Electrical & Energy Systems 2012 42(1) :98 - 104.

[7] Faeze Brahman ,Masoud Honarmand ,Shahram Jadid. Optimal Electrical and Thermal Energy Management of A Residential Energy Hub , Integrating Demand Response and Energy Storage System [J]. Energy and Buildings , 2015 ,90(1) : 65 - 75.

[8] 徐青山,曾艾东,王凯,等. 基于 Hessian 内点法的微型能源网日前冷热电联供经济优化调度. 电网技术, 2016 40(6) : 1657 - 1665.

[9] 魏大钧,孙波,赵峰,等. 小型生物质沼气冷热电联供系统多目标优化设计与运行分析 [J]. 电力系统自动化 2015 39(12) : 7 - 12.

[10] 兰立雄,刘力卿,米增强. 冷电联供系统的多目标运行优化 [J]. 电力系统及其自动化学报 2016 28(5) :

62 - 68.

[11] 王锐,顾伟,吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化 [J]. 电力系统自动化 2011 35(8) : 22 - 27.

[12] 顾伟,吴志,王锐. 考虑污染气体排放的热电联供型微电网多目标运行优化 [J]. 电力系统自动化 2012 , 36(14) : 177 - 186.

[13] 闫占新,刘俊勇,魏震波,等. 多能源等效替代方式及其转移效益模型 [J]. 电网技术 2016 40(6) : 1620 - 1626.

[14] Li Guo ,Wenjian Liu ,Jiejun Cai ,et al. A Two - stage Optimal Planning and Design Method for Combined Cooling ,Heat and Power Microgrid System [J]. Energy Conversion and Management 2013 74 433 - 445.

作者简介:

马超(1990),硕士研究生、工程师,主要研究方向为智慧能源优化规划设计。

(收稿日期:2019-03-04)

(上接第35页)

[7] Sun C ,Liu D ,Wang Y , et al. Assessment of Credible Capacity for Intermittent Distributed Energy Resources in Active Distribution Network [J]. Energies ,2017 10(8) :1104.

[8] 崔杨,李焕奇,张节潭,等. 计及功率相关性的光伏电站群置信容量评估方法 [J]. 太阳能学报,2017, 38 (4) : 1039 - 1044.

[9] 梁双,胡学浩,张东霞,等. 基于随机模型的光伏发电置信容量评估方法 [J]. 电力系统自动化 2012 36(13) : 32 - 37.

[10] 梁双,胡学浩,张东霞,等. 光伏发电置信容量的研究现状与发展趋势 [J]. 电力系统自动化 2011 35(19) : 101 - 107.

[11] 张宁,康重庆,肖晋宇,等. 风电容量可信度研究综述与展望 [J]. 中国电机工程学报 2015 35(1) : 82 - 94.

[12] 方鑫,郭强,张东霞,等. 并网光伏电站置信容量评估 [J]. 电网技术 2012 36(9) : 31 - 35.

[13] 刘洁冰,白婕,翟桥柱. 用于风电机组容量评估的容量可信度快速算法 [J]. 西安交通大学学报 2017 51(6) : 41 - 46.

[14] 暴英凯,王越,唐俊熙,等. 序贯蒙特卡洛方法在电力系统可靠性评估中的应用差异分析 [J]. 电网技术, 2014 38(5) : 1189 - 1195.

[15] 吴耀武,张联邦,李海英,等. 考虑多风电场出力相关性的风电容量可信度评估方法 [J]. 电力自动化设备 2015 39(11) : 8 - 12.

[16] 张联邦,韩寒. 基于等可靠性准则的风电场容量可信度评估方法 [J]. 电工电气,2014(10) : 7 - 10.

[17] 石一辉,张磊琪,李诚,等. 风电容量可信度及其评估方法 [J]. 自动化与仪器仪表 2014(10) : 133 - 136.

[18] 杨咏梅,华煌圣,汪华,等. 储能提升风电容量置信度的策略研究 [J]. 应用科技 2017 44(1) : 18 - 22.

[19] 曲翀,王秀丽,谢绍宇,等. 不同风速模型和可靠性指标对风电可信容量评估的影响 [J]. 电网技术 2013 , 37(10) : 2896 - 2903.

[20] 杨鸣. 基于蒙特卡罗法的配电系统可靠性分析 [D]. 南京:河海大学,2006.

[21] Wang P ,Billinton R. Time Sequential Distribution System Reliability Worth Analysis Considering Time Varying Load and Cost Models [J]. IEEE Transactions on Power Delivery ,1999 ,14(3) : 1046 - 1051.

[22] 朱静,高亚静,刘建鹏,等. 主动配电网供电能力实时评估方法 [J]. 中国电力 2015 48(12) : 96 - 102.

[23] Goswami S K ,Basu S K ,Deb A K , et al. A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization [J]. IEEE Transactions on Power Delivery ,1992 ,7(3) : 1484 - 1491.

作者简介:

陈谦(1979),硕士、高级工程师,主要研究方向为电网规划、电力系统保护与控制。

(收稿日期:2018-11-22)