

基于可靠性约束的风-光-储微网容量优化配置对配电网可靠性影响分析

邓佃毅, 栗文义, 楚冰清, 杨 皓

(内蒙古工业大学电力学院, 呼和浩特 010080)

摘 要: 从经济性角度, 基于序贯蒙特卡洛模拟法评估含风-光-储微网配电网的可靠性。采用一个能准确表征风-光-储微网对配电网可靠性贡献的新指标——微网孤岛运行时间大于主网故障时间的概率作为可靠性约束条件。以风-光-储微网等年值投资费用最低为目标函数, 建立风-光-储微网容量优化配置模型。采用模拟退火粒子群优化算法, 优化配置风-光-储微网容量。针对 RBTS-BUS6 F4 算例系统, 分析不同可靠性约束条件下风-光-储微网对配电网可靠性的影响。结果表明, 优化配置风-光-储微网容量, 既可有效减少微网的投资费用, 又可提高配电网的供电可靠性; 新的可靠性约束条件能很好地反映风-光-储微网对配电网可靠性的影响程度。

关键词: 微网; 配电网; 可靠性分析; 优化配置

中图分类号: TM74

文献标识码: A

0 引 言

微网能有效整合分布式电源、储能及负荷, 实现可再生能源的接纳及与电网的相互支撑^[1]。研究风-光-储微网容量优化配置对配电网可靠性的影响, 对降低微网投资费用、提高配电网供电可靠性、保障电网安全稳定运行等方面都具有现实意义^[2]。文献[3~5]根据微网各微电源、储能和负荷的特性, 以可靠性为约束, 计及设备投资、安装成本、运行维护、环保折算和燃料成本等因素, 以综合成本最低为优化目标, 采用不同算法对风-光-柴-储微网进行优化配置。这些文献大多以缺电概率(loss of power supply probability, LPSP)为可靠性约束条件进行容量优化配置。但对于含微网配电网来说, LPSP 不能很好地反映微网对配电网可靠性的影响程度。文献[6~8]分析了微电源出力特性、接入容量对配电网可靠性的影响, 但未开展微网经济评价, 难以比较可靠性效益与成本的关系。

为准确表征风-光-储微网对配电网可靠性的影响, 本文定义一个新的可靠性约束条件, 建立风-光-储微网容量优化配置模型。采用模拟退火粒子群优化算法优化配置风-光-储微网容量。基于序贯蒙特卡洛模拟法, 分析在不同可靠性约束条件下风-光-储微网对配电网可靠性的影响。

1 风-光-储微网容量优化配置模型

风-光-储微网由风力发电、光伏发电和储能系统组成, 数学模型见文献[9~13]。由风力和光伏发电出力及蓄电池工作特性可确定风-光-储微网的运行方式。以风-光-储微网等年值投资费用最低为目标函数, 建立风-光-储微网容量优化配置模型。

1.1 风/光/储微网运行方式

微网可根据主网状态自动运行于并网或孤岛模式, 内部各组成部分可自动控制。当微网内部发生故障时, 可判断故障元件位置, 自动将故障元

收稿日期: 2016-06-16

基金项目: 内蒙古自然科学基金(2013MS0701); 内蒙古“草原英才”项目(2013); 内蒙古工业大学风能太阳能利用技术省部共建教育部重点实验室2014年度开放课题

通信作者: 栗文义(1963—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事风力发电和可靠性评估等方面的研究。lwyyyl6301@sina.com

件隔离。并网运行时,通过主网平抑风力和光伏发电系统功率波动,蓄电池组充电。孤岛运行时,当风力和光伏发电系统功率输出之和大于负荷需求时,蓄电池组充电,反之蓄电池组放电。当蓄电池组储存容量小于最小允许剩余容量时,微网停运。

1.2 目标函数

目标函数计及设备投资、运行和维护费用,如式(1)所示,取风-光-储微网等年值投资费用最低。

$$\min C_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^N (C_{\text{CPI}} x_i + C_{\text{OMI}} x_i) \quad (1)$$

式中, N ——微电源种类数量; C_{CPI} ——第 i 种电源的等年值设备投资费用; C_{OMI} ——第 i 种电源的年运行和维护费用^[4]; x_i ——第 i 种微电源数目。

1.3 约束条件

1.3.1 可靠性约束

1) 定义

对于含微网配电网来说,当主网故障时,可由微网微电源向微网内负荷持续供电,若持续供电时间大于主网故障持续时间,则微网内负荷供电可不受主网故障的影响,从而提高了微网内负荷及配电网的供电可靠性。为了准确表征微网对配电网可靠性的影响,定义一个可靠性指标——微网孤岛运行时间大于主网故障时间的概率 η , 作为风-光-储微网容量优化配置模型的可靠性约束条件,优化配置风-光-储微网容量,如式(2)所示。

$$\eta = m/n \quad (2)$$

式中, m ——微网孤岛运行时间大于主网故障持续时间的次数; n ——1 a 内主网故障次数。

2) 计算方法

根据微网供电区域内总峰值负荷,采用蒙特卡洛模拟法计算 η , 计算流程如图 1 所示。为研究风-光-储微网对配电网可靠性的影响,优化配置风-光-储微网容量时, η 应满足式(3)。

$$\eta \geq \eta_{\text{set}} \quad (3)$$

式中, η_{set} ——含微网配电网满足一定可靠性时 η 的最小取值。由 η 定义可知, $m \leq n$, η_{set} 取值范围为 0~1。

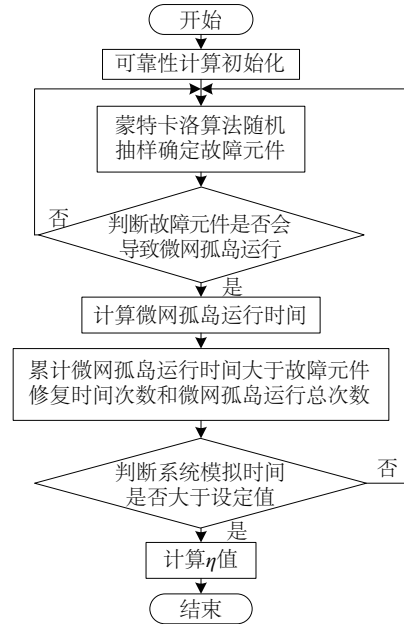


图 1 可靠性约束条件计算流程图

Fig. 1 Flow diagram of reliability constraints calculation

1.3.2 微电源出力约束

各微电源实际出力需满足其上下限约束,即:

$$P_{i\min} \leq P_i \leq P_{i\max} \quad (4)$$

式中, $P_{i\min}$ 、 $P_{i\max}$ ——第 i 种微源出力的下限和上限。

1.3.3 蓄电池剩余电量约束

任何时刻,蓄电池剩余电量应满足式(5)约束:

$$SOC_{\min} \leq SOC(t) \leq SOC_{\max} \quad (5)$$

式中, SOC_{\min} 、 SOC_{\max} ——储能系统剩余电量约束下限和上限。

1.4 可靠性约束条件的选取方法

为了选取一个合理的 η_{set} 值作为风-光-储微网容量优化配置的可靠性约束条件。令 η_{set} 以 0.05 为步长在 0~1 内取值,根据风-光-储微网容量优化配置模型,采用模拟退火粒子群优化算法优化配置风-光-储微网容量。根据配置结果,可得不同 η_{set} 取值情况下与之对应的风-光-储微网等年值投资费用数据。进而建立 η_{set} 与风-光-储微网等年值投资费用曲线。通过分析 η_{set} 与风-光-储微网等年值投资费用之间关系,确定合理的 η_{set} 值。

2 含风-光-储微网配电网可靠性评估方法

传统配电网的可靠性分析主要考虑元件停运

对负荷点供电的影响。含微网配电网可靠性评估应在传统配电网可靠性评估的基础上,考虑当系统元件故障时,是否会导致微网孤岛运行以及微网孤岛运行对配电网可靠性的影响。假设含微网配电网所有元件可修复,元件可靠性模型均采用常规两态模型。根据含微网配电网的特点和序贯蒙特卡洛模拟法原理,含风-光-储微网配电网可靠性评估流程如图 2 所示,步骤如下:

- 1)根据含风-光-储微网配电网配置结果,对系统所有元件随机抽样,取其中无故障工作时间最短的元件为故障元件;
- 2)将系统元件分为微网内外元件两类,根据故障元件位置,将负荷点分为由微网持续供电负荷点、通过转供恢复供电负荷点和不能恢复供电负荷点 3 种情况,分别统计其可靠性数据;
- 3)判断系统模拟时间是否大于设定值,若否,则转到步骤 1)继续运行;若是,则根据各负荷点可靠性数据,计算各负荷点及系统的可靠性指标。

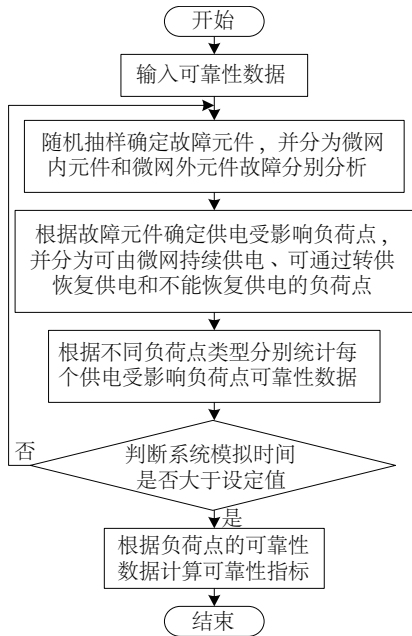


图2 含风-光-储微网配电网可靠性评估流程图
Fig. 2 Flow diagram of distribution system reliability evaluation with wind- photovoltaic -battery microgrids

3 算 例

以 RBTS-BUS6 F4 系统为例,优化配置配电

网中风-光-储微网容量,定量分析不同可靠性约束条件下风-光-储微网接入对配电网可靠性的影响。

3.1 算例系统

RBTS-BUS6 F4 系统元件的可靠性及负荷参数见文献[14,15],含风-光-储微网 RBTS-BUS 6 F4 系统如图 3 所示。分布式电源成本数据如表 1 所示。

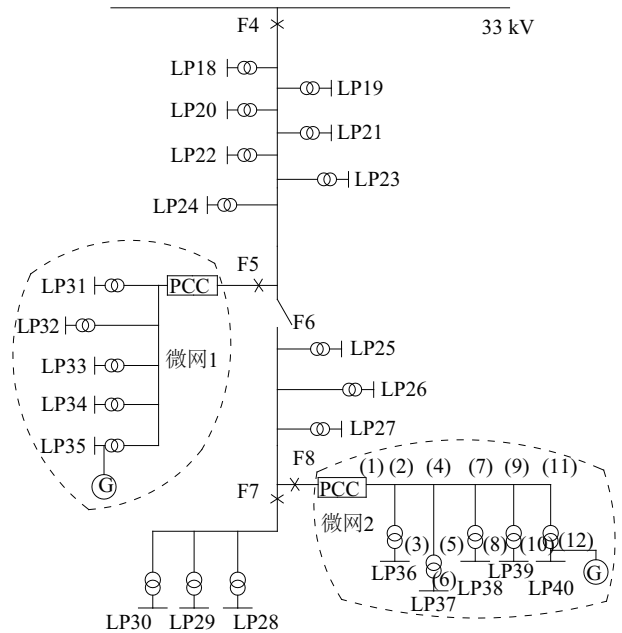


图3 RBTS-BUS 6 F4 系统微网配置结果
Fig. 3 Microgrid configuration results of RBTS-BUS 6 F4 system

表 1 各电源成本数据

Table 1 Cost dates of each power			
电源类型	装机成本/ ¥·kW ⁻¹	更换成本/ ¥·kW ⁻¹	运行维护费用/ ¥·(kW·a) ⁻¹
风电	4535	0.0	35.4
光伏	5000	0.0	88.7
蓄电池	567	453.6	25.7

取微网孤岛切换成功概率为 0.8;蓄电池初始剩余电量 $SOC(0)=0.5$,剩余电量约束 $SOC_{min}=0.1$ 、 $SOC_{max}=0.9$;风力和光伏发电系统使用年限均为 20 a,蓄电池的使用年限为 2.5 a。微网所在地区典型年风速、辐照度气象数据和年负荷曲线如图 4 所示。

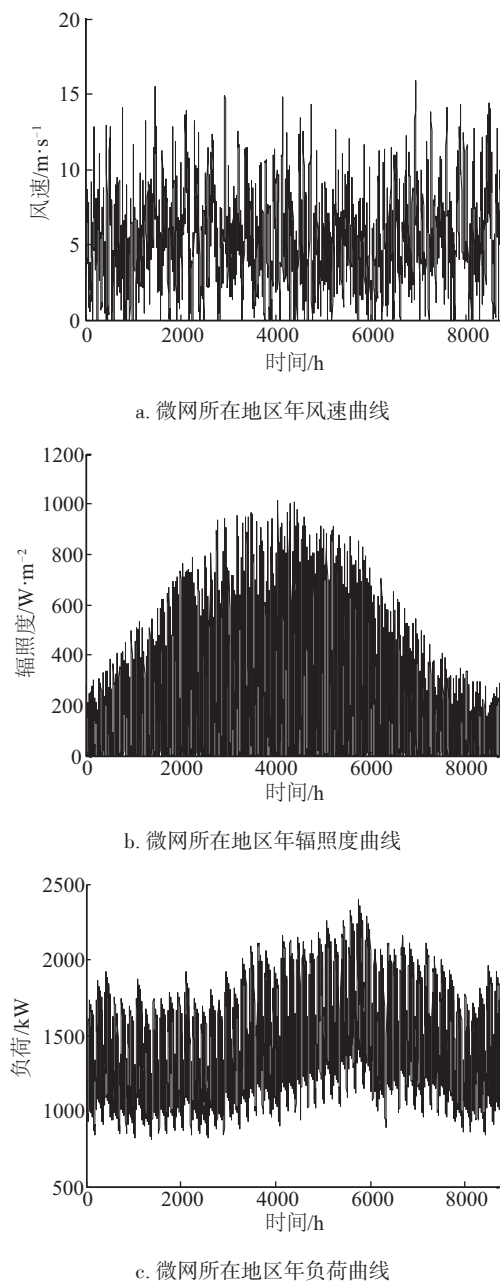
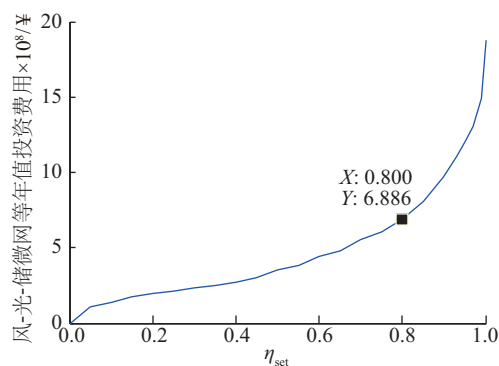


图4 微网所在地区气象数据和负荷曲线

Fig. 4 Meteorological data and the load curve of local microgrid

3.2 η_{set} 值选取

以图3中微网1为例, η_{set} 与风-光-储微网等年值投资费用曲线如图5所示。由图5可知, 随着 η_{set} 的增大风-光-储微网等年值投资费用呈逐渐增大趋势。 η_{set} 越大, 风-光-储微网对配电网可靠性的贡献越大。从图5可知, 当 $\eta_{\text{set}} > 0.80$ 后, 风-光-储微网等年值投资费用迅速增大, 故 η_{set} 取 0.80 较为合理。

图5 η_{set} 与风-光-储微网等年值投资费用曲线Fig. 5 The relation curve of η_{set} and wind-photovoltaic-battery microgrids annual value investment cost

3.3 η_{set} 取不同值时风-光-储微网对配电网可靠性的影响

为分析 η_{set} 取不同值时风-光-储微网对配电网可靠性的影响。 η_{set} 分别取 0.80 和 1.00, 采用模拟退火粒子群优化算法优化配置微网微电源容量, 结果如表2所示。分别对微网接入前 η_{set} 取 0.80 和 1.00 时含微网系统进行可靠性评估, 各系统及负荷点可靠性指标分别如表3和图6所示。

由图6和表3可知, $\eta_{\text{set}} = 0.80$ 时含微网系统负荷点(31~40)的可靠性指标较微网接入前明显减少。系统可靠性指标 $ASAI$ 提高了 2.54×10^{-4} , $EENS$ 减少了 25.427 MWh/a。这表明, 风-光-储微网接入配电网可提高微网供电区域内负荷点以及整个配电网的可靠性。

表2 风-光-储微网微电源容量配置结果

Table 2 The capacity configuration results of the wind/photovoltaic/battery microgrids microsource

η_{set}	微网	风电装机容量/MW	光伏装机容量/MW	蓄电池容量/MWh	微网等年值投资费用 $\times 10^8$ ¥
0.80	微网1	3.83	3.76	4.98	6.885
	微网2	4.21	4.14	5.48	7.57
1.00	微网1	10.45	10.26	13.58	18.77
	微网2	10.90	10.70	14.17	19.58

表3 不同 η_{set} 时含微网系统的系统可靠性指标

Table 3 System reliability index of the system including microgrid under different η_{set} value

RBTS-BUS6 F4 系统		SAIFI/次·年 ⁻¹	SAIDI/h·a ⁻¹	CAIDI/h·a ⁻¹	ASAI	EENS/MWh·a ⁻¹
微网接入前		1.3192	11.1808	8.4752	0.99872	73.4431
微网接入后	$\eta_{\text{set}}=0.80$	1.0428	8.9526	8.5853	0.99898	48.0163
	$\eta_{\text{set}}=1.00$	0.9742	8.4132	8.6356	0.99904	40.9443

注:SAIFI—系统平均停电频率指标;SAIDI—系统平均停电持续时间指标;CAIDI—用户平均停电持续时间指标;ASAI—系统可靠性指标;EENS—系统总电量不足指标;EENS—ENS的期望值。

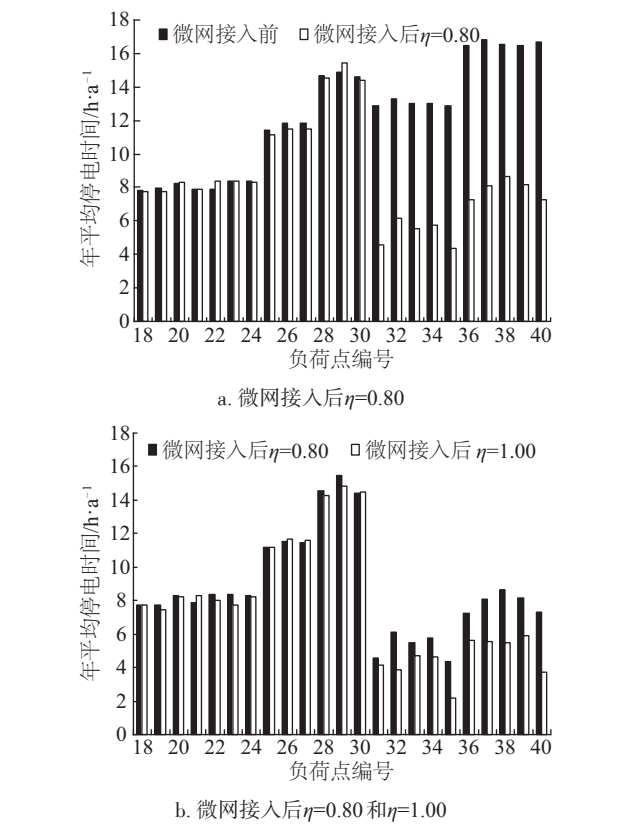


图6 不同 η_{set} 时含微网系统负荷点可靠性指标
Fig. 6 The load point reliability index of the system including microgrid under different η_{set} value

由表2和表3可知, $\eta_{\text{set}}=1.00$ 时含微网系统较 $\eta_{\text{set}}=0.80$ 时系统可靠性指标ASAI提高了 6.2×10^{-5} ,EENS减少了7.072 MWh/a。 $\eta_{\text{set}}=1.00$ 时风-光-储微网等年值投资费用较 $\eta_{\text{set}}=0.80$ 时多近1.67倍。可见,通过比较风-光-储微网对配电网可靠性的贡献和风-光-储微网等年值投资费用之间的曲线关系确定一个合理的 η_{set} 值,来优化配置风-光-储微网容量既可有效减少微网的投资费用,又可提高配电网的供电可靠性。

3.4 η_{set} 对含风-光-储微网配电网可靠性影响分析

为分析 η_{set} 对含风-光-储微网配电网可靠性的影

响。根据 η_{set} 取不同值时风-光-储微网容量优化配置结果,评估含微网系统的可靠性。因可靠性评估结果数据量太大,本文以微网1供电区域内33号负荷点为例,分析 η_{set} 对含风-光-储微网配电网可靠性的影响。 η_{set} 取不同值时含微网系统33号负荷点和系统可靠性指标分别如图7和图8所示。

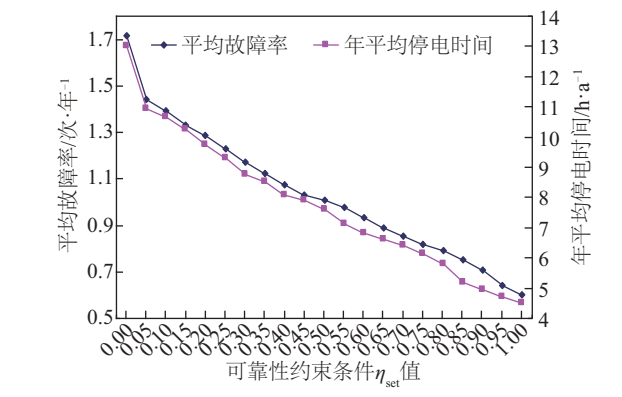


图7 η_{set} 取不同时含微网系统负荷点可靠性指标
Fig. 7 The load point reliability index of the system including microgrid under different η_{set} value

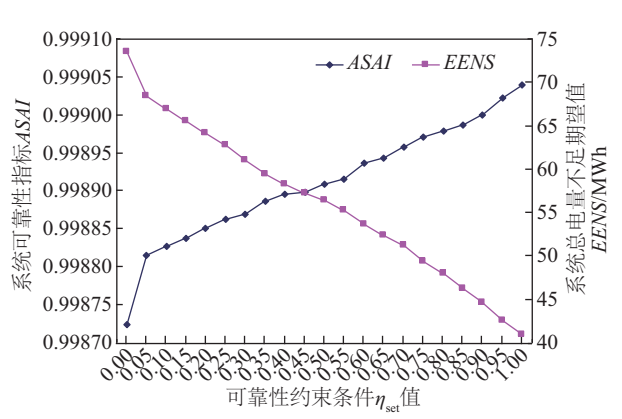


图8 η_{set} 取不同时含微网系统可靠性指标
Fig. 8 Reliability index of the system including microgrid under different η_{set} value

由图7和图8可知, η_{set} 从0逐渐增至1.00的

过程中,含微网系统 33 号负荷点的平均故障率和年平均停电时间指标逐渐减小;系统可靠性指标 $ASAI$ 逐渐增大, $EENS$ 逐渐减小,且它们轨迹几乎呈一条直线。可见,随着 η_{set} 值的逐渐增大,风-光-储微网对其供电区域内负荷点及含微网系统可靠性提高幅度几乎相同,当 $\eta_{set}=1.00$ 时可靠性最高。表明以 η_{set} 作为风-光-储微网容量优化配置可靠性约束条件,能反映风-光-储微网对配电网可靠性的影响程度。

4 结 论

基于 RBTS-BUS6 F4 算例系统,评估不同可靠性约束条件下含风-光-储微网配电网的可靠性。从经济性角度定量分析风-光-储微网对配电网可靠性的影响。结论如下:

1) 风-光-储微网接入配电网可提高微网供电区域内负荷点以及整个配电网的可靠性。

2) 通过比较风-光-储微网对配电网可靠性的贡献和风-光-储微网等年值投资费用之间的曲线关系确定一个合理的可靠性约束条件取值,来优化配置风-光-储微网容量既可有效减少微网的投资费用,又可提高配电网的供电可靠性。

3) 以微网孤岛模式下运行时间大于主网故障时间的概率作为风-光-储微网容量优化配置可靠性约束条件,能反映风-光-储微网对配电网可靠性的影响程度。

[参考文献]

- [1] 别朝红,李更丰,谢海鹏.计及负荷与储能装置协调优化的微网可靠性评估[J].电工技术学报,2014,29(2):64—73.
- [1] Bie Zhaohong, Li Gengfeng, Xie Haipeng. Reliability evaluation of microgrids considering coordinative optimization of loads and storage devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 64—73.
- [2] 江全元,石庆均,李兴鹏,等.风光储独立供电系统电源优化配置[J].电力自动化设备,2013,33(7):19—26.
- [2] Jiang Quanyuan, Shi Qingjun, Li Xingpeng, et al. Optimal configuration of standalone wind-solar-storage power supply system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 19—26.
- [3] 马溪原,吴耀文,方华亮,等.采用细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J].中国电机工程学报,2011,31(25):17—25.
- [3] Ma Xiyuan, Wu Yaowen, Fang Hualiang, et al. Optimal sizing of hybrid solar-wind distributed generation in an islanded microgrid using improved bacterial foraging algorithm[J]. Proceeding of the CSEE, 2011, 31(25): 17—25.
- [4] 丁明,王波,赵波,等.独立风光柴储微网系统容量优化配置[J].电网技术,2013,37(3):15—18.
- [4] Ding Ming, Wang Bo, Zhao Bo, et al. Configuration Optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 15—18.
- [5] 王晶,陈江斌,束洪春.基于可靠性的微网容量最优配置[J].电力自动化设备,2014,34(4):120—127.
- [5] Wang Jing, Chen Jiangbin, Shu Hongchun. Microgrid capacity configuration optimization based on reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 120—127.
- [6] 解翔,袁越,李振杰.含微电网的新型配电网供电可靠性分析[J].电力系统自动化,2011,35(9):67—72.
- [6] Xie Xiang, Yuan Yue, Li Zhenjie. Reliability analysis of a novel distribution network with microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 67—72.
- [7] 马溪原,吴耀文,方华亮,等.基于可靠性评估的微电网配置方法[J].电力系统自动化,2011,35(9):73—77.
- [7] Ma Xiyuan, Wu Yaowen, Fang Hualiang, et al. Allocation of microgrids based on reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 73—77.
- [8] 言大伟,韦钢,胡吟,等.可靠性与经济性相协调的微电网能量优化[J].电力系统自动化,2012,36(8):18—23.
- [8] Yan Dawei, Wei Gang, Hu Yin, et al. microgrid energy optimization with coordination of reliability and economy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 18—23.
- [9] 栗文义,张保会,巴根.风能大规模利用对电力系统可靠性的影响[J].中国电机工程学报,2008,28(1):100—105.
- [9] Li Wenyi, Zhang Baohui, Ba Gen. Reliability impacts

- of large scale utilization of wind energy on electric power systems [J]. Proceeding of the CSEE, 2008, 28 (1): 100—105.
- [10] 栗文义, 张保会, 巴根. 风柴储能系统发电容量充裕度评估[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 62—67.
- [10] Li Wenyi, Zhang Baohui, Bagen. Capacity adequacy evaluation of wind- diesel- storage system [J]. Proceeding of the CSEE, 2006, 26(16): 62—67.
- [11] 王凯, 栗文义, 张小飞, 等. 光伏发电对风光柴储小型孤立发电系统可靠性的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3096—3100.
- [11] Wang Kai, Li Wenyi, Zhang Xiaofei, et al. Impact of photovoltaic generation on reliability of small isolated PVS- wind- diesel- battery power generation system [J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3096—3100.
- [12] Atwa Y M, El-Saadany E F, Salama M M A, et al. Adequacy evaluation of distribution system including wind/solar DG during different modes of operation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26 (4): 1945—1952.
- [13] 梁惠施, 程林, 刘思革. 基于蒙特卡罗模拟的含微网配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 76—81.
- [13] Liang Huishi, Cheng Lin, Liu Sige. Monte Carlo simulation based reliability evaluation of distribution system containing microgrids [J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 76—81.
- [14] Allan R N, Billinton R, Sjarief I, et al. A reliability test system for educational purposes: Basic distribution system data and results [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 813—820.
- [15] Billinton R, Jonnavithula S. A test system for teaching overall power system reliability assessment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1670—1676.

RELIABILITY ANALYSIS OF WIND- PHOTOVOLTAIC-BATTERY MICROGRIDS OPTIMIZATION CONFIGURATION BASED ON RELIABILITY CONSTRAINTS FOR DISTRIBUTION SYSTEM

Deng Dianyi, Li Wenyi, Chu Bingqing, Yang Hao

(College of Electrical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China)

Abstract: Based on Sequential Monte Carlo simulation method, this paper estimates the reliability of distribution networks with wind/photovoltaic/battery microgrids in the view of economic. A new index is proposed as restraint condition of reliability. The index is the probability of the time of isolated island operation longer than main grid fault, that can reflect the wind/photovoltaic/battery microgrids contribution to distribution system accurately. The capacity optimal model of wind/photovoltaic/battery microgrids is built and the minimum charge of wind/photovoltaic/battery microgrid annual value is put as objective function. The built model is solved by Annealing-Particle Swarm Optimization. Analysis the impacts of wind/photovoltaic/battery microgrids to distribution networks under the different restraint conditions form the RBTS- BUS 6 F4 calculation example. The results indicate optimizing the capacity of wind/photovoltaic/battery microgrids not only can reduce cost, but improve the power reliability of distribution networks. The new restraint condition proposed can reflect the incidence of wind/photovoltaic/battery microgrids to distribution networks.

Keywords: microgrids; distribution networks; reliability evaluation; optimal configuration