

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.05.019

新能源接入配电网经济性与可靠性优化研究

阎浩 李陆苗 金蓉英

(南京航空航天大学经济与管理学院,南京,211106)

摘要:为寻求新能源配电网的可靠性和经济性最优,实现新能源电源的优化配置,本文提出将可靠性和经济性同时作为两个优化目标,运用自适应粒子群优化法,对新能源电源进行多目标优化配置。以 IEEE-RBTS Bus 6 主馈线 F4 为例,通过系统仿真找到新能源配电系统可靠性与经济较均衡的 Pareto 最优解集,可根据决策者的偏好选择最优方案。本文的研究为新能源电力系统可靠性和经济评估提供了一个新的研究思路。

关键词:新能源配电网;可靠性和经济性;多目标粒子群优化;Pareto 最优解集

中图分类号:F224.31

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2018)05-0715-07

Optimization Algorithm for Reliability & Economic Assessment of Power Distribution System with Renewables

LÜ Hao, LI Lumiao, JIN Rongying

(College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: To balance the reliability and economic of power distribution system, this paper proposes a multi-objective optimization model which is constructed with both reliability and economic targets. The adaptive multi-objective particle swarm optimization algorithm is used to solve the model, and to optimize the distribution system. This paper takes IEEE-RBTS Bus 6 as the illustrating example. Through system simulation, the Pareto optimal solutions are found which could help decision makers choose appropriate scheme according to their preference. In addition, the paper offers a new research way for the reliability and economic assessment in the renewable power system.

Key words: power distribution system with renewables; reliability & economic; multi-objective particle swarm optimization; pareto optimal solutions

电力系统可靠性是对电力系统按可接受的质量标准和所需数量不间断地向电力系统供应电力和电能能力的度量^[1]。新能源电力系统的可靠性评估在经典可靠性评估方法的基础上,结合新能源发电的特点,一些学者对评估方法做出了改进。经济性是评估电力系统投资可行性的指标,决策者在具有可观经济收益的情况下才会投资新能源电力系统的项目建设。而系统的经济性与可靠性之间又有不可分割的联系,电力供应的可靠性不足最终

会导致客户损失更多的经济成本,系统的可靠性一般与经济投入成正比关系。一些学者已经开始研究电力系统可靠性与经济性之间的定量关系。Ghajar 和 Billinton^[2]通过客户用电损失成本与可靠性的关系,使用一组停电成本数据评估了系统的可靠性价值;Kleyner 和 Sandborn^[3]将影响可靠性的因素纳入系统的价格概率模型中,探讨两者之间的关系;Georgilakis 和 Katsigiannis^[4]对一个小型的新能源自动化电力系统进行了全面的可靠性和

收稿日期:2017-11-28;修订日期:2018-05-24

通信作者:阎浩,副研究员,博士, E-mail: lvhao@nuaa.edu.cn.

引用格式:阎浩,李陆苗,金蓉英. 新能源接入配电网经济性与可靠性优化研究[J]. 南京航空航天大学学报,2018,50(5):715-721. LÜ Hao, LI Lumiao, JIN Rongying. Optimization algorithm for reliability & economic assessment of power distribution system with renewables[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2018,50(5):715-721.

成本效益测算,通过实际案例寻找定量关系。这些研究表明,随着系统可靠性的增加,客户的损失成本会降低。为了使经济性与可靠性能达到一致性评价,必须评估达到一定程度的可靠性和所需的投资成本、客户损失成本之间的关系,常见的可靠性经济评价方法主要包括绝对可靠性评价法,可靠性排列法,可靠性比较分析法,成本效益分析法和可靠性优化法^[5]。前两种方法与经济领域的相关程度较小,主要倾向于可靠性评价,后3种方法属于经济范畴。

实际上,投资者不会为求高可靠性而不断增加投入,但为了减少客户用电损失,必须将可靠性保证在一定范围内。因此如何界定一个最有效率的值使可靠性和经济性都达到较优范围是值得研究的方向。对此,Hamdan等^[6]用负载技术改善系统的可靠性,并分析对经济成本和用电损失的影响。Li^[7]以净效益为目标函数,考虑储能电池的充放电、孤岛发电充裕性和碳排放约束,寻求效益最大化;张宁^[8]以投资和网损费用最小为目标函数,建立了多目标经济性优化模型;张沈习等^[9]考虑风电机组的随机性,最小化无功补偿设备投资和网损,建立多目标无功规划模型。对此,Zhou等^[10]的综述中做了详细的阐述。文献[7-9]中对含有分布式电源和储能的配电网称为微网,在规划目标上,仍是对可靠性的多目标或经济性的多目标进行单独规划,同时考虑到两者的也多是可靠性和经济性互为目标函数和约束条件。可靠性和经济性单独方面或者互为目标函数和约束条件的多目标规划不能很好的体现两者之间的平衡作用。实际项目中,需对可靠性和经济性进行综合评估,并根据决策者偏好做出合理决策。

本文考虑新能源电力可靠性和经济性,同时将两者作为目标函数,在寻求可靠性和经济性最大化的情况下对新能源电源进行多目标优化配置。文中假设单个新能源电源规模一定,分析安装数量对该电网可靠性和经济性的影响。

1 新能源多目标优化模型

本文中单个新能源电源规模一定,因此,系统优化由新能源电源的数量,和储能装置的数量决定。新能源电源包括风电电源和太阳能发电电源,决策变量如下

$$X = \{N_{WG}, N_{PV}, N_{SB}\} \quad (1)$$

式中 N_{WG} , N_{PV} , N_{SB} 分别为风电机组的台数、太阳能电池的列阵数及蓄电池的数量。

新能源电源接入的可靠性和经济性对配电系统是相互制约的,将可靠性和经济性同时作为两个

优化目标,通过模型定量化两者间的优化关系。根据用户损失函数,用户损失费用由系统失电量决定,也就是减少失电量可提高系统可靠性^[11]。另一方面,供电成本越低,经济效益越高。因此本文中的优化目标是寻求失电量和供电成本的最小值,而失电量函数和供电成本函数均是关于 N_{WG} , N_{PV} , N_{SB} 的函数。目标函数如下

$$\min = \{EENS, C\}$$

$$C = E(N_{WG}, N_{PV}, N_{SB})$$

$$EENS = R(N_{WG}, N_{PV}, N_{SB}) \quad (2)$$

引入电能不足期望值(Expected energy not supplied, EENS)作为可靠性指标,指一年内由于日尖峰负荷超过可用发电量而不能供给的电量期望值。

1.1 经济性评估

对于新能源电源的成本估算,主要包括投资成本和运行维护成本,因此其成本计算如下

$$C = C_{IC} + C_{OM} \quad (3)$$

式中: C_{IC} 为等年值投资成本, C_{OM} 为年运行维护成本。

等年值投资成本就是将投资的所有成本换算为在整个寿命期内年平均支付的费用。由于现金有折现率,本文采用等年值法来计算新能源电源的年成本现金折算公式如下

$$I_{AY} = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \cdot I_{IN} \quad (4)$$

式中: I_{AY} 为等年值; I_{IN} 为初期投资; n 为投资回收期, r 为折现率,目前中国电力规划采用的折现率一般为8%。

投资成本高是新能源电源无法大规模发展的重要制约因素,相比于传统的火力发电机组,风力和太阳能发电的机组装机成本要高出许多。另外,采用新能源电源的投资成本中还包括储能装置的电源费用。随着新能源发电技术的日益成熟,初始投资成本会大幅下降。等年值投资成本的公式如下

$$C_{IC} = C_{TIC, WG} P_{WG} \frac{r(1+r)^m}{(1+r)^m - 1} +$$

$$C_{TIC, PV} P_{PV} \frac{r(1+r)^m}{(1+r)^m - 1} + C_{TIC, SB} P_{SB} \frac{r(1+r)^m}{(1+r)^m - 1} \quad (5)$$

式中: $C_{TIC, WG}$, $C_{TIC, PV}$, $C_{TIC, SB}$ 分别为风电机组;太阳能电池单位容量的装机成本和储能装置的单位成本; P_{WG} 为风电机组的装机容量; P_{PV} 为太阳能电池的装机容量; P_{SB} 为储能容量; m 为 RG 和储能装置的使用年限。

运行维护成本即新能源发电机组和储能装置在运行过程中耗费的维护成本,可折算成与设备利用率相关的运行费用比例因子 K , 单位为元/

(kW · a)^[12]

$$C_{OM} = \sum_{i=1}^n P_i K_i \quad (6)$$

式中: P_i 为第*i*个电源的装机容量, K_i 为第*i*个电源的单位运行费用。

1.2 可靠性评估

目前已有的新能源发电类型有风力发电、光伏发电、生物质能发电、沼气发电、地热发电等,根据国内的自然资源量和目前主要的资源利用种类,考虑的新能源发电包括太阳能发电和风力发电两类。考虑新能源的配电网可靠性模型分为电力输出模型(包括风力发电输出功率模型和太阳能发电输出功率模型)、元件模型、负荷模型以及为稳定新能源发电出力而增加的储能系统模型。

在风力发电输出功率模型中,风力发电的输出功率主要受风速的影响,机组出力状态由风速决定,当风速大于启动风速 V_{ci} 时,开始发电;当风速在 V_{ci} 和 V_{co} 之间,风机为正常工作状态;当风速大于切出风速 V_{co} 时,风机停止发电^[13]。函数关系近似如下

$$P_w = \begin{cases} 0 & 0 \leq V_t \leq V_{ci} \\ k_1 \cdot V_t + k_2 & V_{ci} \leq V_t \leq V_r \\ P_r & V_r \leq V_t \leq V_{co} \\ 0 & V_{co} \leq V_t \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_w 为*t*时刻风电机组的输出功率; V_t 为*t*时刻的风速; V_{ci} , V_r , V_{co} 分别为风机的切入、额定和切出风速; P_r 为风机的额定功率; k_1 , k_2 可由式(8)计算取得

$$\begin{cases} k_1 = \frac{P_r}{V_r - V_{ci}} \\ k_2 = -k_1 \cdot V_{ci} \end{cases} \quad (8)$$

在太阳能发电输出功率模型中,太阳能发电的输出功率主要由光照强度决定,光照强度近似为Beta分布,光照强度越大,光伏发电的输出功率越大,因此两者关系如下

$$P_{PV} = \gamma \cdot A \cdot \eta \quad (9)$$

式中: P_{PV} 为光伏发电的输出功率, γ 为实际光照强度, A 为电池组件的总面积, η 为总光电转换效率。 A , η 可由单个电池组件的面积和光电转换效率求得^[14]。

在进行可靠性评估时,对于变压器、断路器、馈线等非电源元件均采用两态模型,即正常状态和故障状态。在元件模型中,元件的故障率 λ 和修复率 μ 均为随时间变化的函数,一年有8760个小时,受天气、自然能资源等因素的影响,因变量按小时变化。无故障工作时间(Time between failures, TBF)和故障修复时间(Time to repair, TTR)为

随机变量,一般假定其服从指数分布,公式如下

$$T_{TBF} = -\frac{1}{\lambda} \ln x \quad (10)$$

$$T_{TTR} = -\frac{1}{\mu} \ln x \quad (11)$$

式中: T_{TBF} , T_{TTR} 分别为无故障工作时间、故障修复时间; λ , μ 为故障率或者修复率,是 $[0,1]$ 上均匀分布的随机数。在配电网可靠性评估过程中,TBF和TTR均可通过随机抽样和计算获得^[14]。

负荷的变动随机性较大,每时每刻都在变化,预测负荷的模型是多样化的。本文选择了适合于序贯蒙特卡洛法的负荷模型,用小时最大负荷与年最大负荷的比值来表示仿真时刻的负荷需求期望值,以小时为单位的模拟更好的仿真每一时刻的系统状态,使结果更加符合实际。公式如下

$$P_L(t) = P_w(t) \times P_d(t) \times P_h(t) \times P_L^{\max} \quad (12)$$

式中: $P_w(t)$ 表示周负荷峰值占年负荷峰值的百分比, $P_d(t)$ 表示日负荷峰值占周负荷峰值的百分比, $P_h(t)$ 表示时负荷峰值占日负荷峰值的百分比, P_L^{\max} 为年最大负荷^[14]。

新能源发电和储能装置协同作用,形成风光储联合系统,能够改善电能质量,并提高电网的可靠性,两者对可靠性的作用体现在主网发生故障时。当主网正常运行,即新能源电源并网运行时,新能源电源只是承担了部分电力;当主网某元件发生故障,即联合系统孤岛运行时,电网的部分区域停运,此时以新能源电源为中心,对其周围的部分负荷点可继续供电,减小因故障造成的停运范围。本文中,储能装置起到平滑新能源电源输出功率的作用,两者的协同作用成为一个输出恒定功率的风光储联合系统。当新能源电源输出功率大于负荷需求功率时,多余电量储存在储能装置中;当新能源电源输出功率小于负荷需求功率时,储能装置将通过放电来满足需求。

在孤岛运行时,若新能源电源输出功率较小甚至不能输出功率,需要依靠储能装置释电能来维持孤岛的正常运行。此时孤岛的运行时间由储能装置的存储容量和新能源电源发电量决定,接入新能源电源系统下对孤岛系统的供电时间 T_b 可由以下求解得到

$$Q_{\min} = Q_s + Q_c - Q_f \quad (13)$$

式中: Q_s 为储能装置满充时的容量, Q_c 为新能源电源在孤岛运行期间为储能装置充电的电量, Q_f 为储能装置在孤岛运行期间因电源电量不足而放电的电量, Q_{\min} 为储能装置的最小剩余电量。其中 Q_c 可表示为在对孤岛的供电时间 T_b 内,新能源电源的输出功率大于需求负荷率时,对储能装置的充

电量, Q_f 可表示为在对孤岛的供电时间 T_b 内, 新能源电源的输出功率小于需求负荷率时, 储能装置的放电量^[15]。可由积分求和表示如下

$$\begin{cases} Q_c = \int_0^{T_b} \left[\sum_k P_{DG,k}(t) \right] dt \\ P_L(t) < P_{DG}(t) \\ Q_f = \int_0^{T_b} \left[P_L(t) - \sum_k P_{DG,k}(t) \right] dt \\ P_L(t) > P_{DG}(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_L(t)$ 为 t 时刻的负荷需求功率, $P_{DG,k}(t)$ 为 t 时刻第 k 个新能源电源的输出功率。其中储能的放电功率 P_c 不能大于其最大放电功率 P_{max} , 即

$$P_c = \sum_k P_{DG,k}(t) - P_L(t) \quad P \leq P_{max} \quad (15)$$

具体的孤岛供电时间可通过仿真模拟孤岛运行期间每一时刻的电源出力和负荷大小来计算。

因此, 可靠性目标函数的具体表达式如下

$$\begin{aligned} EENS &= \sum_{i=1}^M U_i P_{L,i} \\ P_{L,i} &= \begin{cases} P_{L,i} & P_{WG} N_{WG} + P_{PV} N_{PV} + C_{SB} < P_{L,i} \\ 0 & P_{WG} N_{WG} + P_{PV} N_{PV} + C_{SB} \geq P_{L,i} \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

式中: U_i 为第 i 个负荷点的故障持续时间, $P_{L,i}$ 为第 i 个负荷点的负荷需求量, M 为负荷点数量。其中 P_{WG} 和 P_{PV} 为风力发电机和太阳能电池阵的单位时间输出功率。

1.3 约束条件

本文的新能源电源接入规模优化模型主要对风力发电机和太阳能电池阵的出力规模、储能装置的输出功率进行约束, 保证配电系统能正常运行。约束条件如下

$$\text{s. t. } \begin{cases} 0 \leq N_{WG} P_{WG} \leq P_{peak} \\ 0 \leq N_{PV} P_{PV} \leq P_{peak} \\ P_{SBmin} \leq N_{WG} P_{WG} \leq P_{SBmax} \end{cases} \quad (17)$$

式中: P_{peak} 为系统峰值需求量 10.9 MW, P_{SBmin} 为 20% P_{SB} , P_{SBmax} 为 80% P_{SB} 。

2 基于自适应多目标粒子群的优化算法

对配电网进行多目标规划的方法众多, 传统方法也是大部分的方法是将各目标赋予加权系数, 进行线性加权从而转化为单目标问题。但是线性加权法在求解过程中存在较多缺陷: 各子目标的赋权主观性较强, 缺乏说服力; 若各目标之间相互矛盾, 最优值相互制约, 则无法简单加权; 各目标的求解过程相互独立, 信息无法交互, 计算效率低下, 更有可能无法得到 Pareto 最优解^[16]。

为解决传统方法的缺陷, 启发式智能算法应运而生。它无需考虑各子目标的权重, 能有效解决目标间的制约问题, 通过启发式算法高效求得 Pareto 最优解。对于新能源电源接入电网的设计, 在保证系统可靠性的同时获取经济上的最优性, 给决策者提供一组具有实用价值的、权衡可靠性与经济性的最优解。

本文考虑到多目标粒子群算法具有记忆的特点, 能更快的收敛于最优解, 并引入随机黑洞机制和动态惯性权重对 PSO 方法进行优化, 用动态选择领导粒子来保证种群的多样性, 选用逐步淘汰距离法提高 Pareto 最优解的均匀性和多样性^[17]。

改善后的自适应 PSO 算法提高了 Pareto 最优解的多样性和分布均匀性, 其具体的算法实现如图 1 所示。

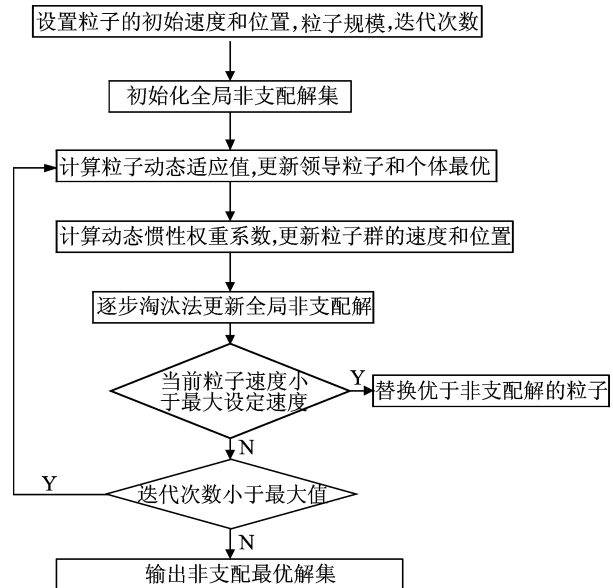


图 1 改进后 PSO 算法流程

Fig. 1 Improved particle swarm optimization flow chart

步骤 1 初始化。设置粒子的初始速度和位置, 粒子群规模, 迭代次数和全局最优非支配解。

步骤 2 更新领导粒子和个体最优。计算粒子动态适应值更新个体最优解对应的位置, 动态选择全局领导粒子。

步骤 3 更新粒子群的速度和位置。计算新的动态惯性权重系数, 产生新的粒子群速度和位置。

步骤 4 更新非支配解。用逐步淘汰距离法对非支配粒子进行排序, 选择下一次迭代的粒子。

步骤 5 判断当前粒子速度。若在设定的最大速度范围内, 则替换种群中优于非支配解集的粒子。若超过最大速度, 则进行下一个判断。

步骤 6 若迭代次数没有达到最大值,则返回步骤 2 继续操作;否则输出非支配解,即 Pareto 最优解集。

3 算例分析

本算例基于原始系统 IEEE-RBTS Bus 6 主馈线 F4,进行区域节点模型对配电网进行馈线分区^[18],在系统中加入 5 套新能源电源和储能装置(图 2)。其中包括 30 条线路、23 个负荷点、21 个隔离开关、23 个熔断器、23 个配电变压器和 4 个断路器;系统平均负荷 4.81 MW,最大负荷 10.93 MW,各设备元件的原始数据参考文献[19]。

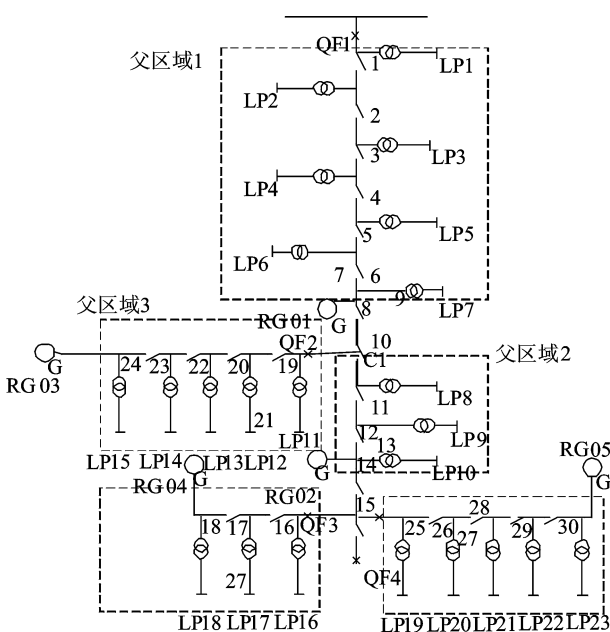


图 2 系统布局结构

Fig. 2 System structure

按改进后 PSO 算法流程进行多目标优化计算。在配电系统尾端接入新能源电源,每个风电机组的装机容量为 0.1 MW,每个太阳能电池阵的装机容量为 0.05 MW,每个储能容量为 1 MW · h。风电机组、太阳能电池和储能装置的单位容量装机成本分别为 1 万元/kW, 4 万/kW, 750 元/(kW · h)。新能源电源和储能装置的使用年限为 20 年,折现率为 8%。

根据仿真结果得到多目标优化模型的目标函数数值如图 3 所示,目标函数中供电成本与失电量两个目标值相互制约,失电量随着供电成本的增加而降低,也即系统可靠性越高,经济性越差。因此,图 3 中的 Pareto 前沿就是在权衡可靠性和经济性两者的关系后,得到的能够使两个目标函数值相对均

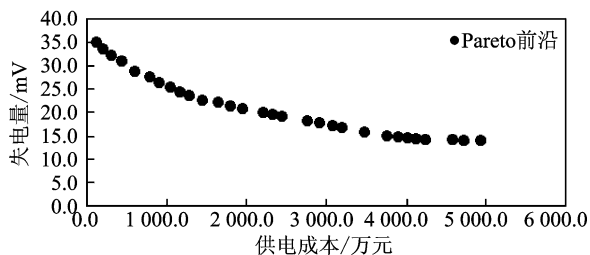


图 3 多目标粒子群优化对应的 Pareto 最优解

Fig. 3 Pareto optimal solutions for multi-objective particle swarm optimization

衡的 Pareto 最优解集。

图 3 中的供电成本和失电量由风力发电机组、太阳能电池阵和储能装置的数量决定。表 1 是从图 3 中选取部分最优解形成的优化结果,总的来说可靠性的提高所付出的经济性代价越来越高。表 1 中, WG 表示风电机组数量, PV 表示太阳能电池阵数量, SB 为储能装置数量。方案 1 至方案 7 中,风电机组和太阳能电池阵的数量依次增加,且接入的电源中以风电机组为主,随着供电成本的增加,失电量递减幅度较大。方案 8 至方案 11 中,风电机组的数量保持在 80 个左右,太阳能电池阵的数量大幅增加,导致经济成本快速增加,失电量递减幅度相对较小。由上述可知 Pareto 最优解是一个集合,其中包括一系列方案,最终的方案选取还是要根据决策者的偏好决定,若决策者偏向经济成本的投入,前几个方案是较好的选择;若决策者偏向提高系统可靠性,后几个方案为佳。

表 1 部分优化结果

Tab. 1 Results of optimization

方案	WG/个	PV/个	SB/个	Cost/元	EENS/(kW · h)
1	8	0	2	109.52	34.92
2	37	2	0	432.18	31.02
3	60	7	0	779.06	27.50
4	68	15	1	1 042.60	25.48
5	80	27	3	1 444.19	22.64
6	81	46	11	1 950.64	20.79
7	101	66	25	2 753.70	18.19
8	76	115	0	3 196.55	16.67
9	95	135	7	3 901.28	14.79
10	80	176	6	4 584.05	14.14
11	88	184	14	4 935.37	13.97

4 结束语

本文建立了多目标优化模型,求解新能源电源

和储能装置的接入规模对配电系统可靠性和经济性的影响,分别将系统失电量和供电成本作为量化可靠性和经济性的目标函数,用风电机组,太阳能电池阵和储能装置的接入数量作为决策变量。然后介绍了改进后的 PSO 方法,通过动态选择领导粒子和逐步淘汰距离法保持 Pareto 最优解的多样性和均匀性。最后通过 MATLAB 编程对 IEEE-RBTS Bus 6^[19] 系统主馈线 F4 进行仿真求解和算例分析,所得结果解决了系统可靠性与经济性相互矛盾的问题,给出了优化结论:(1)初始阶段,随着新能源电源和储能装置的接入,供电成本增加,失电量递减幅度较大;随着系统可靠性越来越高,供电成本增加,失电量递减幅度越来越小。(2)优先考虑多接入风电机组以平衡可靠性和经济性,随着可靠性不断优化,优先增加太阳能电池阵接入数量。对于新能源电源的具体优化配置需要根据决策者的个人偏好从最优解中选取最佳方案。为新能源电力系统多目标优化配置,提供了一个新的研究思路。

新能源电力系统相对于传统电力系统比较复杂,本文仅从可靠性和经济性来,考虑新能源电源的安装数量,具有一定的片面性。在今后的研究中可以从多个角度考虑,例如经济性、可靠性、碳排放等多目标,对新能源电力系统进行多目标优化配置,以实现可持续发展。

参考文献:

- [1] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003:1-10.
GUO Yongji. Power system reliability analysis[M]. Beijing: Tsinghu University Press, 2003:1-10.
- [2] GHAJAR R F, BILLINTON R. Economic costs of power interruptions: A consistent model and methodology[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2006, 28(1):29-35.
- [3] KLEYNER A, SANDBORN P. Minimizing life cycle cost by managing product reliability via validation plan and warranty return cost[J]. International Journal of Production Economics, 2008, 112(2):796-807.
- [4] GEORGILAKIS P S, KATSIGIANNIS Y A. Reliability and economic evaluation of small autonomous power systems containing only renewable energy sources[J]. Renewable Energy, 2009, 34(1):65-70.
- [5] 贺艳辉. 配电网可靠性与经济性分析[D]. 济南: 山东大学, 2008.
HE Yanhui. Reliability and economy analysis on distribution system [D]. Jinan: Shandong University, 2008.
- [6] HAMDAN H A, GHAJAR R F, CHEDID R B. A simulation model for reliability-based appraisal of an energy policy: The case of Lebanon[J]. Energy Policy, 2012, 45:293-303.
- [7] LI Dengfeng. Optimal configuration of microgrid power supply based on maximizing net benefits[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41:20-26.
- [8] 张宁. 配电网多目标经济性优化模型和算法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8):48-53.
ZHANG Ning. Optimal multi-objective economic model and algorithm for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8):48-53.
- [9] 张沈习, 程浩忠, 张立波, 等. 含风电机组的配电网多目标无功规划[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1):40-46.
ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, ZHANG Libo, et al. Multi-objective reactive power planning in distribution system incorporating with wind turbine generation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1):40-46.
- [10] ZHOU P, JIN R Y. Reliability and economic evaluation of power system with renewables: A review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 58:537-547.
- [11] MAHERI A. Multi-objective design optimization of standalone hybrid wind-PV-diesel systems under uncertainties [J]. Renewable Energy, 2014, 66(6):650-661.
- [12] 李登峰. 并网型微网电源容量优化配置模型及算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
LI Dengfeng. Capacity optimization model and algorithm for grid-connected microgrid power sources [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [13] 王理厦. 分布式发电单元储能定容研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
WANG Lixia. Research on sizing of storage capacity in distributed generation and storage unit[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [14] 叶萌. 分布式电源选址定容及其对配电网可靠性的影响分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
YE Meng. Locating and sizing of distribution generation and its impacts on distribution system reliability [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [15] 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.
LIANG Huishi, CHENG Lin, LIU Sige. Monte Carlo simulation based reliability evaluation of distri-

- bution system containing microgrids[J]. Power System Technology, 2011, 35(10):76-81.
- [16] BILIL H, ANIBA G, MAAROUFI M. Multi-objective optimization of renewable energy penetration rate in power systems [J]. Energy Procedia, 2014, 50: 368-375.
- [17] 程杉, 陈民铀, 黄慧宸. 含分布式发电的配电网多目标无功优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10):45-50.
CHENG Shan, CHEN Minyou, HUANG Yichen. Multi-objective reactive power optimization of distribution system penetrated with distributed generation [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10):45-50.
- [18] 谢莹华, 王成山. 基于馈线分区的中压配电系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5):35-39.
XIE Yinghua, WANG Chengshan. Reliability evaluation of medium voltage distribution system based on feeder partition method[J]. Proceeding of the CSEE, 2004, 24(5):35-39.
- [19] 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.

(编辑:张蓓)