

DOI: 10.7667/PSPC150819

并网光伏发电置信容量评估

余志强, 王淳, 胡奕涛, 钟云, 汪硕承

(南昌大学电气与自动化系, 江西 南昌 330031)

摘要: 提出了一种应用含衰老和竞争机制的粒子群算法(Particle Swarm Optimization with Aging and Challenging Mechanism, ACM-PSO), 分别从负荷侧和电源侧求解并网光伏发电置信容量。在构建了以常规机组类型数为系统状态变量的基础上, 将 ACM-PSO 算法作为一种系统状态扫描及分类工具筛选出对发电可靠性指标有贡献的系统故障状态集。定义了负荷比例增加方式, 以光伏发电接入前后系统电力不足期望(loss of load expectation, LOLE)保持不变为原则, 分别从负荷侧和电源侧构建了目标函数, 应用 ACM-PSO 算法求解光伏发电的有效荷载能力和等效常规机组容量。应用改进的 IEEE-RTS79 测试系统验证了所提方法的有效性。

关键词: 光伏发电; 发电可靠性; 有效荷载能力; 等效常规机组容量; 含衰老和竞争机制的粒子群算法

Capacity credit evaluation of grid-connected photovoltaic generation

YU Zhiqiang, WANG Chun, HU Yitao, ZHONG Yun, WANG Shuocheng

(Department of Electrical and Automatic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: A particle swarm optimization with aging and challenging mechanism (ACM-PSO) is proposed for evaluating the capacity credit of photovoltaic (PV) generation from load side and generation side respectively. Firstly, on the basis of system state variables constructed by the number of types of conventional unit, ACM-PSO is adopted as a scan and classification tool to screen out the system failure state set which contributes to generation reliability indices. Secondly, proportional load increase mode is defined, and with the loss of load expectation remaining unchanged as the principle before and after the PV access, objection functions are constructed both from load side and generation side, and application of ACM-PSO for evaluating the effective load carrying capacity and equivalent conventional unit capacity of PV is executed. Finally, the proposed method is applied to an improved IEEE-RTS79 system to verify its effectiveness.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51167012 and No. 51467012).

Key words: photovoltaic generation; generation reliability; effective load carrying capacity; equivalent conventional unit capacity; particle swarm optimization with aging and challenging mechanism

0 引言

人类在分享现代工业快速发展成果的同时, 也表达出对化石能源日益枯竭、生态环境日渐恶劣的担忧以及对开发利用可再生能源的渴望^[1]。作为一种理想可再生能源, 光伏发电因太阳能储量丰富以及光电转换零污染特点而备受关注。此外, 积极稳健的政策扶持和日臻完善的并网技术支撑使得光伏发电有了飞跃式的发展。但受太阳能资源和发电设

备特性的影响, 光伏发电具有显著的时序性和随机性, 大规模并网将给系统的运行带来新的挑战。准确、有效地分析光伏发电接入对发电系统可靠性的影响及评估光伏发电置信容量, 不仅为高效利用太阳能提供了理论依据, 也为人类走出环境污染困局奠定了基础。

分析含光伏发电的发电系统可靠性方法主要有解析法^[2-3]和模拟法^[4-12]。解析法依据系统可靠性数学模型并采用严格的数学手段求解系统可靠性指标, 计算结果可信度高。但光伏发电接入增加了系统的不确定性, 解析法的研究过程将变得异常复杂且无法反映出光伏发电的时序性。模拟法的核心思

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51167012, 51467012); 江西省研究生创新专项资金项目(YC2014-S066)

想是将系统状态按其概率大小进行重复抽样实验。模拟法方便描述光伏发电的时序性, 且能给出系统可靠性指标及其分布情况。由于系统故障状态通常以极其稀疏的形式散布于系统状态空间, 导致模拟法不能以“真实”概率对故障状态进行抽样, 造成可靠性指标计算结果偏差较大甚至出现收敛问题。鉴于此, 本文尝试将 ACM-PSO 算法^[13]作为系统状态扫描及分类工具应用于求解含光伏发电的发电系统可靠性问题, 以克服模拟法计算结果偏差较大及可能出现收敛问题的不足。

评估光伏发电置信容量有从负荷侧计算的有效荷载能力(Effective Load Carrying Capacity, ELCC)^[5-6]和从电源侧计算的等效常规机组容量(Equivalent Conventional Unit Capacity, ECUC)^[8,10]两类方法。上述文献均从负荷侧或电源侧单方面给出了光伏发电置信容量, 具有一定的局限性。本文以光伏发电接入前后 LOLE 保持不变为原则, 分别从负荷侧和电源侧的角度构建了目标函数, 提出采用 ACM-PSO 算法求解光伏发电的 ELCC 和 ECUC。采用改进的 IEEE-RTS79 测试系统对所提方法进行测试, 结果表明所提方法能正确求解发电系统可靠性指标, 且能高效地从负荷侧与电源侧计算光伏发电的置信容量。

1 ACM-PSO 算法概述

ACM-PSO 算法是在基本 PSO 算法^[14]的基础上, 通过引入自然界中普遍存在的衰老和竞争机制改进而成的。异于基本 PSO 算法, ACM-PSO 算法给群体领袖(Leader)分配了一个合适的寿命 Θ 和衰老速度 θ , 并根据 Leader 领导群体搜索最优解的能力自动调整其寿命 Θ 。当 Leader 寿命耗尽时, 群体将产生一个竞争者(Challenger)来竞争甚至取代 Leader 的领袖地位, 而 Challenger 能否胜任群体领袖地位需对其领导能力进行 T 代评估方能确定。在迭代过程中, 粒子分别根据式(1)和式(3)更新速度和位置向量。

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1r_1(pb_{id}^k - x_{id}^k) + c_2r_2(Leader_d - x_{id}^k) \quad (1)$$

$$|v_{id}^{k+1}| \leq x_{d,max} \quad (2)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (3)$$

式中: $i=1, 2, \dots, M$, M 为粒子群规模; $d=1, 2, \dots, n$, n 为解空间的维度; k 为当前迭代次数; w 为惯性权重; c_1 、 c_2 为学习因子; r_1 和 r_2 为区间[0,1]上的随机数; $x_{d,max}$ 为第 d 维解空间的上限。

由以上叙述可知, ACM-PSO 算法是在基本 PSO 的基础上增加了 Leader 寿命调整、Challenger

产生和 Challenger 领导能力评估 3 个关键策略, 具体内容见文献[13,15], 此处不再赘述。

2 含光伏发电的发电系统可靠性计算

2.1 系统故障状态集的形成

文献[16]以各常规机组运行状态为系统状态变量, 应用 MSGA 算法求解发电系统可靠性指标, 获得了较为满意的效果。为降低系统状态的维数, 提高算法的搜索效率, 本文将机组类型(将额定容量和可靠性参数均相同的常规机组合并为同一类型机组)数作为系统状态变量, 将 ACM-PSO 算法作为系统状态扫描及分类工具, 用于筛选出系统故障状态集, 详细过程如下。

1) 输入形成系统故障状态集所需原始参数, 包括各类常规机组运行参数(额定容量、台数、强迫停运率、故障率和修复率)、系统年最大负荷 L_{max} 和系统状态概率阈值 ε 。

2) 粒子群初始化, 包括设置粒子群规模 M 、粒子维度 D (即机组类型数)、惯性权重 ω 、学习因子 c_1 、 c_2 、初始迭代次数 $k=1$ 、最大迭代次数 k_{max} 、领袖寿命 Θ_0 和竞争者评估代数 T 并初始化各粒子的速度、位置向量 V 和 X 、个体极值 $pbest$ 和全局极值 $gbest$ 及领袖 $Leader$ 。

3) 按式(4)计算粒子(即系统状态) i 的概率 P_i , 若 $P_i < \varepsilon$, 表示系统状态 i 为正常运行状态且不加入系统故障状态集, 其适应度值等于 P_i 的 $1e-5$ 倍, 跳至步骤 6); 否则, 执行步骤 4)。

$$P_i = \prod_{j=1}^D (1 - q_j)^{x_j} \prod_{j=1}^D q_j^{x_{j,max} - x_j} \quad (4)$$

式中: q_j 为第 j 类常规机组的强迫停运率; x_j 、 $x_{j,max}$ 分别为第 j 类常规机组的运行台数和总台数。

4) 根据式(5)计算系统状态 i 的有效发电容量 E_i , 若 $E_i \geq L_{max}$, 表明系统状态 i 处于正常运行状态, 其适应度值设定为一极小数且不加入系统故障状态集, 跳至步骤 6); 若 $E_i < L_{max}$, 表明系统出现电力不足, 执行步骤 5)。

$$E_i = \sum_{j=1}^D x_j g_j \quad (5)$$

式中: x_j 的含义同上; g_j 为第 j 类常规机组额定容量。

5) 判断系统状态 i 是否与系统故障状态集中的已有故障状态重复, 若重复, 其适应度值为 P_i 的 $1e-5$ 倍且不加入系统故障状态集; 否则, 系统状态 i 为一新的系统故障状态, 按式(6)一式(8)分别计算其适应度值、故障频率及等效组合数后加入系统故障状态集, 执行步骤 6)。故障状态 i 存入系统故障状态

集的结构如图 1 所示。

X_i						P_i	F_i	E_i	C_i
x_1	x_2	...	x_i	...	x_D				

图 1 系统故障状态集的结构

Fig. 1 Construction of failure state array

$$fitness_i = P_i \quad (6)$$

$$F_i = P_i \left(\sum_{j=1}^D (x_{j,max} - x_j) \mu_j - \sum_{j=1}^D x_j \lambda_j \right) \quad (7)$$

$$C_i = \prod_{j=1}^D \left(\frac{x_{j,max}}{x_j} \right) \quad (8)$$

式中： λ_j 、 μ_j 分别为第 j 类常规机组的故障率和修复率；其他参数同上。

6) 重返并执行步骤 3) 至所有粒子的适应度值计算及对应的系统状态筛选完毕，执行步骤 7)。

7) 迭代次数更新， $k=k+1$ 。判断 $k \geq k_{max}$ 是否成立，若成立，算法结束并输出系统故障状态集；否则，执行步骤 8)。

8) 根据式(1)、式(3)更新各粒子的速度和位置向量 V 、 X ，并更新 $pbest$ 、 $gbest$ 和 $Leader$ 转步骤 3) 继续执行，直至算法满足收敛条件为止。

2.2 时序负荷曲线的修正

将时序负荷曲线与光伏出力时序曲线进行合并(光伏出力作为“负负荷”修正系统负荷)，得到修正后的时序负荷曲线。

2.3 发电可靠性指标的计算

利用故障集中各系统故障状态对应的系统有效发电容量 $E_{j,t}$ 与修正后的时序负荷 L_t 卷积计算，可得到系统发电可靠性指标，具体过程如下。

1) 按式(9)计算 t 时刻系统电力不足概率 $LOLP_t$ 。

$$LOLP_t = \sum_{j=1}^S \alpha_j P_j C_j \quad (9)$$

式中：当 $E_{j,t} \geq L_t$ 时， $\alpha_j=0$ ，表明系统状态 j 处于正常运行状态；反之， $\alpha_j=1$ ，表明系统状态 j 为故障状态； S 为系统故障状态集中系统状态数。

2) 若全年划分为 N_T 个小时，则根据式(10)一式(12)可分别计算出 $LOLE$ 、 $EENS$ 和 $LOLF$ 。

$$LOLE = \sum_{t=1}^{N_T} LOLP_t \quad (10)$$

$$EENS = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{j=1}^S \alpha_j P_j C_j (L_t - E_{j,t}) \quad (11)$$

$$LOLF = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{j=1}^S \alpha_j F_j C_j + \sum_{t=2}^{N_T} \beta_t (LOLP_t - LOLP_{t-1}) \quad (12)$$

式(11)和式(12)中的 α_j 和 S 的含义同式(9)，式(12)的第一项、第二项分别表示发电容量变化和系统负荷变化对系统故障频率的影响，当括号内的差值小于零时， $\beta_t=0$ ；反之， $\beta_t=1$ 。

3 光伏发电置信容量评估

目前，基于可靠性分析的光伏发电置信容量评估有从负荷侧计算的 ELCC 和从电源侧计算的 ECUC 两种指标。评估光伏发电置信容量的指标不同，所涉及的目标函数和约束条件也不同。

3.1 基于负荷侧的光伏发电置信容量评估

ELCC 是指在系统等可靠性条件下，新增光伏容量可使系统额外承担负荷的能力。文献[5-6]以光伏接入前后系统等可靠性为迭代目标，采用弦截法以负荷定值增加的方式求解了光伏发电的 ELCC。负荷定值增加的方式显然不符合负荷实际变化规律，为此，本文提出了一种更贴近实际的负荷变化方式，即负荷比例增加。所谓负荷比例增加是指系统年时序负荷按同一比例系数增加，记此比例系数为 ΔL_p 。按负荷比例增加的方式求解光伏发电 ELCC 的目标函数及约束条件分别如式(13)和式(14)所示。

$$\min f = [R(G < L_t) - R(G < (1 + \Delta L_p)L_t - G_{PV,t})]^2 \quad (13)$$

$$\Delta L_p \leq \left(\Delta P_{PV} = \frac{G_{PV}}{L_{max}} \right) \quad (14)$$

式(13)中： f 为系统 $LOLE$ 改变量最小化函数； $R(\bullet)$ 为系统 $LOLE$ 计算函数； G 、 $G_{PV,t}$ 和 L_t 分别为系统初始装机容量、 t 时刻光伏出力和 t 时刻系统初始负荷。式(14)为目标搜索约束条件，即系统负荷增加比例 ΔL_p 不应大于光伏渗透率(光伏装机容量 G_{PV} 与系统年最大负荷 L_{max} 的比值) ΔP_{PV} 。

3.2 基于电源侧的光伏发电置信容量评估

在不改变系统可靠性的前提下，光伏接入能替代的常规机组的容量被称为 $ECUC$ 。在应用模拟法求解含光伏发电的发电系统可靠性的基础上，文献[8,10]分别采用基本 PSO 算法和线性插值法求解了光伏发电的 $ECUC$ ，计算结果可信度较低。本文在将 ACM-PSO 算法作为系统状态筛选优化工具应用于求解含光伏发电的发电系统可靠性的同时，采用 ACM-PSO 算法求解光伏发电的 $ECUC$ ，其目标函数及约束条件分别如式(15)和式(16)所示。

$$\min f = [R(G < L_t) - R(G' < L_t - G_{PV,t})]^2 \quad (15)$$

$$ECUC = G - (g_1, g_2, \dots, g_d, \dots, g_D) * X'_{sol} \leq G_{PV} \quad (16)$$

式中： G' 为光伏接入后系统常规机组容量； g_d 为第 d 类常规机组的额定容量； X'_{sol} 为 $X_{sol}=(x_1, x_2, \dots,$

x_d, \dots, x_D)的转置, 其余参数含义同 3.1 节。

3.3 光伏发电置信容量评估流程图

图 2 给出了应用双层 ACM-PSO 算法求解光伏发电置信容量的流程。第一层 ACM-PSO 算法是作为系统状态扫描及分类工具形成系统故障状态集; 第二层 ACM-PSO 算法是作为优化工具迭代求解光伏发电的 $ELCC$ 和 $ECUC$ 。

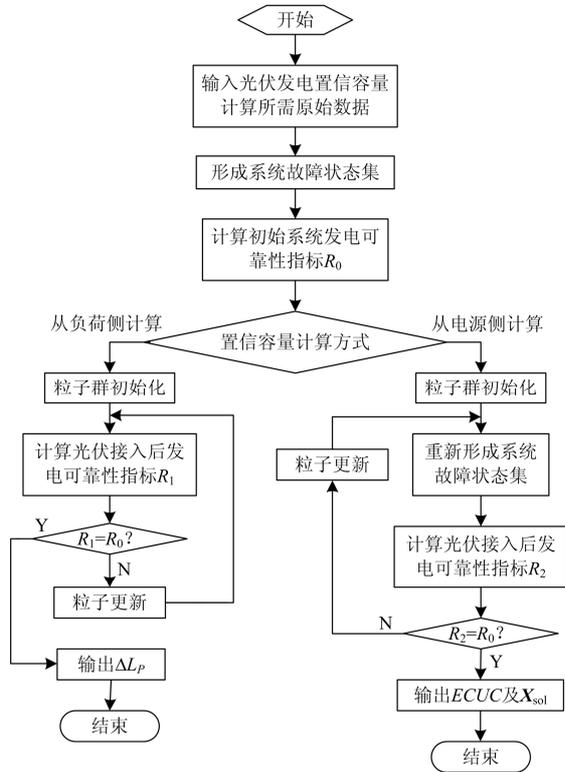


图 2 光伏发电置信容量评估流程图

Fig. 2 Flow chart of capacity credit evaluation of PV generation

4 算例分析

4.1 算例系统及参数设置

IEEE-RTS79 测试系统^[17]由 9 类 32 台 12 MW 到 400 MW 容量不等的常规机组构成, 系统装机容量、年最大负荷、年平均负荷分别为 3 405 MW、2 850 MW 和 1 751 MW, 全年负荷持续时间 $N_T = 8 736$ h。在不同规模光伏发电具有相同的时序出力因子的前提下, 将装机规模不同的光伏发电接入 IEEE-RTS79 测试系统并对含光伏发电的发电系统可靠性及其置信容量作重复性统计测试。测试过程中, 筛选系统故障状态集的 ACM-PSO 算法参数为: 粒子群规模=50、粒子维度=9, 最大迭代次数=200, 概率阈值 $\varepsilon=1e-15$; 计算光伏发电 $ELCC$ 时, ACM-PSO 算法参数为: 粒子群规模=10, 粒子维度=1、最大迭代次数=50; 计算光伏发电 $ECUC$ 时,

ACM-PSO 算法参数为: 粒子群规模=10, 粒子维度=9、最大迭代次数=100。惯性权重 ω 、学习因子 c_1 、 c_2 、领袖寿命 Θ_0 和竞争者评估代数 T 的设置参照文献 [15]。

4.2 可靠性分析结果

表 1 为应用 ACM-PSO 算法计算 IEEE-RTS79 测试系统的发电可靠性指标, 其中 $LOLE$ 、 $EENS$ 和 $LOLF$ 的单位分别为 h/年、MWh/年和次/年。由表 1 可知, 应用模拟法求解系统发电可靠性指标时, 其结果或大于或小于“真实值(解析法求解的发电可靠性指标)”, 误差分别为 1.7%、2.5%和-5.0%, 原因在于模拟法比例抽样机制导致高概率的系统状态可能被重复抽样而低概率的系统状态无法被抽样。ACM-PSO 算法采用按系统状态适应度值大小进行抽样的机制, 能比较全面且无重复地筛选出对发电可靠性指标有贡献的系统故障状态, 指标计算误差分别为 -0.15%、-0.23%和-0.6%, 计算精度高于模拟法 10 倍左右, 证实了所提方法的精确性。

表 1 IEEE-RTS79 测试系统的发电可靠性指标

Table 1 Generation reliability of IEEE-RTS79 test system

方法类型	发电可靠性指标		
	$LOLE$	$EENS$	$LOLF$
解析法 ^[3]	9.355	1 168.00	2.019 7
模拟法 ^[11]	9.372	1 197.44	1.919 2
ACM-PSO	9.341	1 165.30	2.007 6

4.3 $ELCC$ 的评估结果

表 2 列出了应用 ACM-PSO 算法求解 $ELCC$ 的结果。由表 2 可知, 光伏并网规模的增大可使系统额外承担负荷增加的比例得到提升。与此同时, 表 2 的第 4 列给出了光伏渗透率与负荷增加比例的比值, 可以看出, 光伏接入允许系统负荷增长的比例约为光伏渗透率的 1/3。

表 2 $ELCC$ 的评估结果

Table 2 Assessment results of $ELCC$

光伏接入容量/MW	$ELCC$	光伏渗透率	$\Delta P_{PV}/\Delta L_P$
	$\Delta L_P/\%$	$\Delta P_{PV}/\%$	
100	1.20	3.51	2.93
400	4.65	14.04	3.02
800	9.26	28.07	3.03
1 600	18.49	56.14	3.04

4.4 $ECUC$ 的评估结果

表 3 给出了应用 ACM-PSO 算法从系统常规机组类型构成的可行解中搜索出不同规模光伏接入后系统的最优常规机组组合及其 $ECUC$ 。在表 3 中, “U12”表示常规机组的额定容量为 12 MW, 其余

机组依次类推；光伏接入容量为 0 MW 对应的常规机组组合为系统初始常规机组组合。由表 3 可知，接入 100 MW 光伏时，可替代 3 台 12 MW 的常规机组，即光伏发电的 *ECUC* 为 36 MW；接入 1 600 MW 光伏时，可替代 12 MW、20 MW、50 MW、76 MW、100 MW 和 155 MW 的常规机组各 1 台，此时，光伏发电的 *ECUC* 为 413 MW。

表 3 *ECUC* 的评估结果

Table 3 Assessment results of *ECUC*

常规机组类型	光伏接入后的常规机组组合				
	光伏接入容量/MW				
	0	100	400	800	1 600
U12	5	2	2	3	4
U20	4	4	4	2	3
U50	6	6	6	5	5
U76	4	4	3	4	3
U100	3	3	3	2	2
U155	4	4	4	4	3
U197	3	3	3	3	3
U350	1	1	1	1	1
U400	2	2	2	2	2

4.5 *ELCC* 和 *ECUC* 的比较

为比较采用 *ELCC* 与采用 *ECUC* 评估光伏发电置信容量间的差异，图 3 分别给出了系统年平均负荷、系统年最大负荷与系统负荷增加比例 ΔL_p 的乘积(分别记为 *ELCC_A* 和 *ELCC_P*)以及 *ECUC* 的置信度(光伏置信容量与光伏装机容量的比值)曲线。由图 3 可知，在较为宽泛的光伏接入渗透率水平下，光伏发电 *ELCC_A* 的置信度基本维持在 20%左右，*ELCC_P* 的置信度大致在 33%左右趋于稳定。同时，由图 3 可知，*ECUC* 的置信度在一定光伏渗透率下降幅明显，但随着光伏渗透率的提升，其下降幅度趋于平缓，基本停滞于 25%左右。考虑到电力系统电源规划一般针对于全系统最大负荷时刻进行，因而将接入的光伏发电容量等效为系统允许的负荷增加比例更易发挥光伏发电的容量价值。

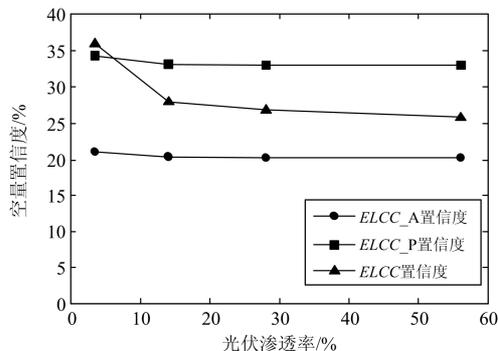


图 3 光伏发电容量置信度

Fig. 3 Capacity credit of PV generation

5 结论

1) 相比将各常规机组运行状态作为系统状态变量，以常规机组类型数作为系统状态变量，降低了目标搜索空间的维度，提高了算法的计算效率。

2) *ACM-PSO* 算法作为系统故障状态筛选优化工具应用于求解含光伏发电的发电系统可靠性指标时，其根据系统状态适应度值大小进行抽样的机制，可无重复地筛选出系统故障状态集，提高了发电可靠性的计算精度。

3) 基于可靠性的原则，分别从负荷侧和电源侧构建了光伏发电置信容量评估模型，并应用 *ACM-PSO* 算法计算了光伏发电置信容量。算例分析表明，将光伏发电等效为系统负荷增加的比例时，该比例系数约为光伏渗透率的 1/3。此外，在将光伏发电容量等效为可替换的常规机组容量的同时，应用 *ACM-PSO* 算法从常规机组类型构成的系统状态空间中搜索出光伏接入后系统最优的常规机组组合。光伏发电置信容量不同指标比较结果表明，在电源规划过程中将光伏发电容量等效为系统允许的负荷增加比例更易发挥光伏发电的调峰作用。

参考文献

- [1] 闫凯, 张保会, 瞿继平, 等. 光伏发电系统暂态建模与等值[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 1-8.
YAN Kai, ZHANG Baohui, QU Jiping, et al. Photovoltaic power system transient modeling and equivalents[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 1-8.
- [2] ZHANG Peng, WANG Yang, XIAO Weidong, et al. Reliability evaluation of grid-connected photovoltaic power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 379-389.
- [3] SINGH C, GUBBALA N V. An alternative approach to rounding off generation models in power system reliability evaluation[J]. Electric Power System Research, 1996, 36(1): 728-734.
- [4] 蔡德华, 陈柏熹, 程乐峰, 等. 实施需求侧管理对提高发电系统可靠性的影响探究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 51-56.
CAI Dehua, CHEN Baixi, CHENG Lefeng, et al. Effective study about the implementation of demand side management on improving reliability of generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 51-56.
- [5] 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.
- FANG Xin, GUO Qiang, ZHANG Dongxia, et al. Capacity credit evaluation of grid-connected photovoltaic generation considering weather uncertainly[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 27-32.
- [6] 梁双, 胡学皓, 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.
- LIANG Shuang, HU Xuehao, ZHANG Dongxia, et al. Probabilistic models based on evaluation method for capacity credit of photovoltaic generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 32-37.
- [7] 王海瑛, 白晓民, 马纲. 并网光伏电站的发电可靠性评估[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 1-5.
- WANG Haiying, BAI Xiaomin, MA Gang. Reliability assessment of grid-integrated solar photovoltaic system[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 1-5.
- [8] 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.
- FANG Xin, GUO Qiang, ZHANG Dongxia, et al. Capacity credit evaluation of grid-connected photovoltaic generation[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 31-35.
- [9] 高英, 谢开贵, 胡博, 等. 考虑光伏出力与负荷相关性的光伏电站容量可信度评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 1-6.
- GAO Ying, XIE Kaigui, HU Bo, et al. Photovoltaic power capacity credit evaluation model considering the correlation between photovoltaic power generation and system load[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 1-6.
- [10] 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): 15-23.
- WANG Xiuli, WU Zechen, QU Chong. Reliability and capacity value evaluation of photovoltaic generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 15-23.
- [11] BILLITON R, LI W. Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo simulation[M]. New York: Plenum Press, 1994.
- [12] ARABALI A, GHOFRANI M, ETEZADI-AMOLI M, et al. Stochastic performance assessment and sizing for a hybrid power system of solar/wind/energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 363-371.
- [13] 余志强, 王淳. 基于含衰老和竞争机制的粒子群算法的配电网重构[J]. 华东电力, 2014, 42(6): 1158-1163.
- YU Zhiqiang, WANG Chun. Distribution network reconfiguration based on particle swarm optimization with aging and challenging mechanism[J]. East China Electric Power, 2014, 42(6): 1158-1163.
- [14] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C] // IEEE international Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995: 1942-1948.
- [15] CHEN Weineng ZHANG Jun, LI Ying, et al. Particle swarm optimization with an aging leader and challengers[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2013, 17(2): 241-258.
- [16] SAMAAN N, SINGH C. Adequacy assessment of power system generation using a modified simple genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(4): 974-981.
- [17] Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee. IEEE reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, PAS-98(6): 2047-2054.

收稿日期: 2015-05-14; 修回日期: 2015-11-27

作者简介:

余志强 (1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析; E-mail: Yu_ncu@163.com

王淳 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划、优化理论在电力系统中的应用。

(编辑 周金梅)