

含光伏发电的电力系统随机生产模拟

董 驰, 李燕青

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北保定 071003)

Stochastic Production Simulation of Power System with Photovoltaic Generation

DONG Chi, LI Yanqing

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

摘 要: 光伏发电规模越来越大, 其并网对系统的影响不容忽视, 研究含光伏发电的电力系统随机生产模拟具有重要意义。在空间上以一个光伏逆变器组为单位, 建立了考虑光照与元件故障双重因素的光伏逆变器组多状态模型。在时间上以一天为一个时段, 各时段采用不同的多状态模型。将多状态模型加入随机生产模拟, 采用等效电量函数法进行计算, 得到了发电量、可靠性及经济性等指标。评估了光伏发电容量效益和电量效益。算例分析验证了本文所提方法的合理性。

关键词: 光伏发电; 逆变器; 随机生产模拟; 多状态模型

Abstract: The increasing of photovoltaic power generation scale has great impact on power systems, which should not be neglected, so simulation study on stochastic production of power grid with photovoltaic power generation is of great significance. In the spatial scale, the multi-state model of a PV-inverter is built by considering dual factors of solar irradiation and component failure with a PV-inverter as a unit. In the temporal scale, different multi-state models are adopted in different time intervals with one day as an interval. With the multi-state model added to stochastic production simulation, equivalent energy function approach is used to calculate such indexes as the amount of power, reliability, economic. Therefore, the capacity benefit and electricity benefit of PV generation are evaluated. In the end, the rationality of the proposed method is verified by examples.

Keywords: photovoltaic generation; inverter; stochastic production simulation; multi-state model

0 引 言

光伏发电是继风力发电后最有潜力实现规模化发展和应用的可再生能源发电技术^[1]。随机生产模拟是考虑随机因素如负荷波动、发电机组随机停运等情况, 按照一定的模拟计算原则安排机组运行,

计算出各个机组发电量、燃料消耗、生产成本及系统可靠性指标的方法^[2]。光伏发电规模越来越大, 其并网对系统的影响不容忽视, 研究含光伏发电的电力系统随机生产模拟, 对电力系统的规划、运行和效益评估具有重要意义。

含光伏发电的电力系统随机生产模拟研究的核心问题是建立光伏发电出力模型, 目前主要有两种模型: 负值负荷模型和多状态机组模型。文献 [3] 采用了负值负荷模型, 将光伏时序出力作为负的负荷从原始负荷曲线中减去, 但没有计入元件故障的影响; 文献 [4] 以风电为研究对象, 基于蒙特卡罗模拟建立负值负荷模型, 采用等效电量频率法进行随机生产模拟, 但该方法需要大量的抽样样本和迭代次数才能收敛, 当系统较大时, 运算量较大; 文献 [5] 将光伏发电系统处理为多状态机组, 可以模拟光伏出力的随机性、波动性, 但仍没有计入元件故障的影响; 文献 [6] 建立了考虑光伏系统元件故障的多状态模型并进行了随机生产模拟, 但仍存在以下 3 个问题:

① 把整个光伏系统看作一台并网机组, 仍需要进行状态抽样来确定整个光伏系统的可用容量。

② 全年共用一个多状态模型, 无法计及光伏出力在不同季节、不同天的相异性。

③ 由于该文中建立的多状态模型仅为日间出力的等效, 在进行随机生产模拟时需昼夜分段模拟, 增加了模拟过程的复杂性。

鉴于此, 本文将一个光伏逆变器组看作一台并网机组, 避免了状态抽样过程, 首先建立了不考虑元件故障的光伏逆变器组多状态模型, 然后与容量状态概率表联立得到考虑光辐射与元件故障双重因素的多状态模型。其次, 为模拟光伏出力在一年中不同季节、不同天的相异性, 本文以一天为一个时

段, 不同时段采用不同的多状态模型, 且建立的多状态模型为光伏全天出力的等效, 在随机生产模拟时不再昼夜分段, 简化了模拟过程。最后, 从电量效益和容量效益两方面进行了光伏发电效益评估。算例分析验证了本文所提方法的合理性。

1 光伏逆变器组多状态模型

随机生产模拟考虑了发电机组的随机停运因素, 对于光伏发电系统来说, 其出力的随机性主要来自两个方面, 一是太阳辐射引起的, 二是本身元件故障引起的。在进行光伏发电出力建模时需综合考虑这两个方面。

1.1 光伏发电系统结构

典型的光伏发电系统结构^[7]如图1所示。光伏电池板通过串并联形成光伏阵列, $m_1 \times m_2$ 块光伏电池板与一台逆变器连接组成一个光伏逆变器组(如图中虚线框所示)接入电网, 总共有 k 个光伏逆变器组。

由于元件故障的影响, 光伏系统可能会出现多种容量状态。对于大规模的光伏发电系统, 如100MW级, m_1 、 m_2 的值可达几十, k 的值可达几百, 精确划分整个系统的容量状态十分复杂, 因此本文以一个光伏逆变器组为单位进行建模。

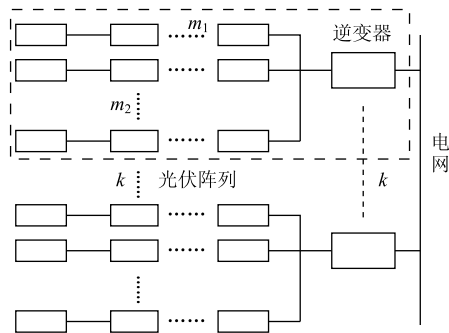


图1 光伏发电系统结构

1.2 不考虑元件故障的多状态模型

最大功率跟踪策略下光伏电池功率输出特性可由公式(1)表示^[3]:

$$P_{pv} = P_{std} f_{pv} \left(\frac{R_a}{R_{std}} \right) [1 + \alpha (T_a - T_{std})] \quad (1)$$

式中: P_{pv} 为光伏电池实际输出功率; P_{std} 为光伏电池在标准环境下的额定功率; f_{pv} 为光伏电池损耗系数; R_a 为实际光辐射强度 (W/m^2); R_{std} 为标准环境条件下的光辐射强度, 通常取 $1000W/m^2$; α

为光伏电池功率温度系数; T_a 为实际环境温度; T_{std} 为标准环境条件下的温度, 常取 $25^\circ C$ 。

光辐射强度在一年中的不同季节、不同天是不同的, 因此不同时段的光伏出力多状态模型也应不同。本文在不同天采用不同的多状态模型。

已知某天的光辐射强度时间序列为 $\{R_{a1}, R_{a2}, \dots, R_{an}\}$, 温度时间序列为 $\{T_{a1}, T_{a2}, \dots, T_{an}\}$, 根据公式(1)可求得该天的光伏逆变器组出力时间序列 $\{P_{pv1}, P_{pv2}, \dots, P_{pvn}\}$ 。

对序列 $\{P_{pv1}, P_{pv2}, \dots, P_{pvn}\}$ 进行状态聚类, 令 $P_m = \max(P_{pv1}, P_{pv2}, \dots, P_{pvn})$, 设 N 为光伏逆变器组出力的状态个数, 每一个出力状态值可由公式(2)求得

$$P_i = \frac{(i-1)P_m}{N-1}, i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

设 p_i 为出力状态 P_i 的概率值, 由公式(3)求得

$$p_i = \frac{n_i}{n} \quad (3)$$

式中: n_i 为序列 $\{P_{pv1}, P_{pv2}, \dots, P_{pvn}\}$ 中落在出力状态 P_i 覆盖区域的离散点个数; n 为序列 $\{P_{pv1}, P_{pv2}, \dots, P_{pvn}\}$ 中总的离散点数。

出力状态 P_i 的覆盖区域 δ_i 可用图2来说明:

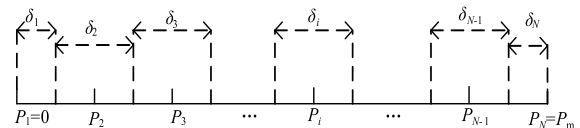


图2 各出力状态覆盖区域

由此可以得到与光伏逆变器组各个出力状态对应的概率值, 将各出力状态及其概率整理在表1中。按照该方法, 可得到每天的出力状态及其概率值。

表1 不考虑元件故障的多状态模型

出力状态/kW	P_1	P_2	...	P_N
概率	p_1	p_2	...	p_N

1.3 考虑元件故障影响的多状态模型

根据光伏电池板和逆变器的不可用率分析光伏逆变器组的容量状态, 具体方法见文献 [6], 建立光伏逆变器组的容量状态概率表, 如表2。

表2 光伏逆变器组容量状态概率表

容量状态	$C_1=0$	C_2	...	$C_{N'}=1$
概率	c_1	c_2	...	$c_{N'}$

根据概率乘法定理联立表 1 和表 2，得到考虑元件故障影响的光伏逆变器组各出力值及其概率，如表 3 所示。表 3 中所有概率值相加的和为 1。

表 3 联立表 1 和表 2

出力	概率	...	出力	概率
$P_1 \times C_1$	$p_1 \times c_1$...	$P_N \times C_1$	$p_N \times c_1$
...
$P_1 \times C_N$	$p_1 \times c_N$...	$P_N \times C_N$	$p_N \times c_N$

然后按照公式(2)对表 3 中的出力值进行状态划分。相关研究^[5-6]表明，状态数取 5 即可满足要求。因此可得到考虑元件故障影响的光伏逆变器组出力状态 $\{G_1, G_2, G_3, G_4, G_5\}$ 。

设 P_j 和 p_j 分别为表 3 中的某一出力值及其概率值。 P_j 位于出力状态 G_K 和 G_{K+1} 之间，则 P_j 将以 p_{j1} 的概率归入出力状态 G_K ，以 p_{j2} 的概率归入出力状态 G_{K+1} ：

$$p_{j1} = \frac{G_{K+1} - P_j}{G_{K+1} - G_K} \times p_j \quad (4)$$

$$p_{j2} = \frac{P_j - G_K}{G_{K+1} - G_K} \times p_j \quad (5)$$

按照此方法分析表 3 中的所有出力值，同一出力状态的概率值相加，最终可得到每个出力状态的概率值 $\{g_1, g_2, g_3, g_4, g_5\}$ 。

至此，可以建立某天的考虑光辐射与元件故障双重因素的光伏逆变器组多状态模型，如表 4。

表 4 光伏逆变器组多状态模型

出力状态/kW	$G_1=0$	G_2	G_3	G_4	G_5
概率	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5

2 电力系统随机生产模拟

本文采用等效电量函数法^[2]进行含光伏发电的电力系统随机生产模拟。等效电量函数法是在等效持续负荷曲线理论的基础上建立了一个新的函数，即等效电量函数，以对电量函数的卷积代替了对等效持续负荷曲线的卷积，计算速度和计算精度都较好，且在处理多状态机组时较为方便。

该方法的原理已由文献 [2] 给出，在此不再赘述。本文在进行模拟时，对常规机组和光伏逆变器组分别采用了两状态模型和多状态模型，模拟流

程如图 3 所示。

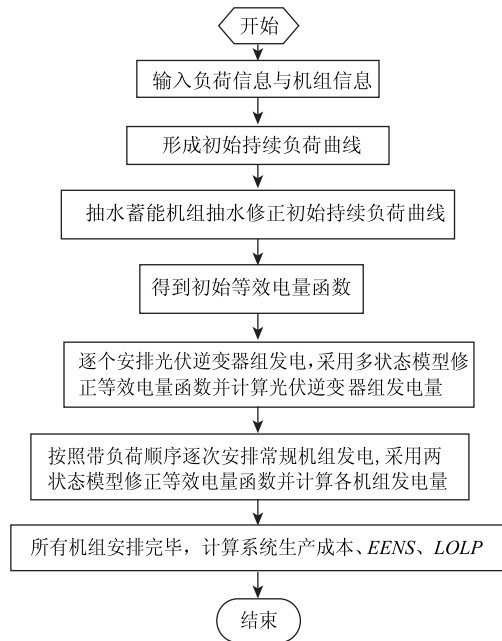


图 3 随机生产模拟流程

数据输入：负荷信息为研究周期 T 内的时序负荷值；机组信息为机组类型、机组额定容量、强迫停运率、煤耗率、水电给定发电量、抽蓄机组抽水电量、光伏逆变器组的各个状态值及其概率等。

机组带负荷顺序：依据优先使用新能源发电的原则，首先安排光伏发电，将一个光伏逆变器组看作一台机组，各组之间顺序不分先后；核电带基荷运行；燃煤、燃气、燃油机组按照度电燃料成本由低到高依次安排发电；为充分利用水能，丰水期水电带基荷，枯水期水电按照给定电量机组在等效持续负荷曲线上确定工作位置；抽水蓄能机组抽水工况相当于负荷，通过修正初始持续负荷曲线来模拟，发电工况等同于水电。

数据输出：各机组发电量、系统生产成本、系统可靠性指标电量不足期望 $EENS$ 、缺负荷概率 $LOLP$ 等。

3 光伏发电效益评估

本文从电量效益和容量效益两个方面来评估光伏发电对电力系统的价值。

3.1 光伏发电电量效益评估

电量效益与发电量有关，为有光伏比无光伏时系统总燃料成本、环境成本和缺电成本的减少量：

$$CE = \Delta C_{\text{fuel}} + \Delta C_{\text{env}} + \Delta C_{\text{EENS}} \quad (6)$$

燃料成本、环境成本和缺电成本分别由公式(7)、(8)、(9)求出。

$$C_{\text{fuel}} = \sum_{i=1}^n c_{\text{fuel}i} E_{gi} \quad (7)$$

$$C_{\text{env}} = \sum_{i=1}^n c_{\text{env}i} E_{gi} \quad (8)$$

$$C_{\text{EENS}} = c_{\text{EENS}} E_{\text{EENS}} \quad (9)$$

式中： $c_{\text{fuel}i}$ 、 $c_{\text{env}i}$ 、 E_{gi} 分别为机组*i*的度电燃料成本、度电环境成本和发电量； c_{EENS} 为缺电成本，本文取60\$/MWh； n 为机组总数。

3.2 光伏发电容量效益评估

光伏发电容量效益为在满足相同的负荷水平与可靠性水平条件下，由于投入光伏发电而减少的常规机组容量投资费用。可由公式(10)、(11)求出^[8]：

$$C_B = \alpha C_{\text{ECC}} \quad (10)$$

$$\alpha = c_{\text{conv}} T / (8760 \times H_{\text{conv}}) \quad (11)$$

式中： C_B 为光伏发电容量效益； C_{ECC} 为保持系统原有可靠性水平不变的前提下，光伏并网后能替代的常规发电机组容量，即置信容量； α 为投资费用换算系数； c_{conv} 为常规机组的单位容量投资费用； H_{conv} 为常规机组的寿命； T 为随机生产模拟总时间。

4 算例分析

4.1 算例数据

本文算例采用IEEE-RTS测试系统^[9]，年最大负荷2850MW，模拟总时间为52周。机组总装机容量3405MW，机组参数如表5所示。光伏系统相关参数参见文献[6]。光照、温度数据参见文献[10]。

表5 机组参数

类型	容量/ MW	数目/ 台	强迫 停运率 (FOR)	燃料成本/ (\$/MWh)	环境成本/ (\$/MWh)
燃油	12	5	0.02	27.6	5
燃气	20	4	0.1	43.5	2.5
水电	50	6	0.01	0	0
燃煤	76	4	0.02	14.4	12
燃油	100	3	0.04	23	5
燃煤	155	4	0.04	11.64	12
燃油	197	3	0.05	22.08	5
燃煤	350	1	0.08	11.4	12
核电	400	2	0.12	6	0.4

4.2 光伏逆变器组多状态模型

应用本文第1节方法建立光伏逆变器组多状态模型。选取6月中旬某天为代表日进行分析，计算得出该日的光伏逆变器组多状态模型如表6所示。

表6 代表日光伏逆变器组多状态模型

出力状态/ kW	0	54.37	108.74	163.11	217.48
概率	0.51590	0.11929	0.11245	0.17079	0.08157

由表6可以看出，0出力状态概率最大，这是因为光伏发电夜间无出力。最大出力状态为217.48kW，这是由于存在光伏电池损耗，温度及光照条件也非标准环境条件，光伏出力很难达到额定值。

4.3 随机生产模拟

分以下4个场景进行随机生产模拟，计算结果如表7所示。

场景1：未接入光伏的IEEE-RTS系统。

场景2：原系统中加入100MW光伏，采用昼夜分时段的方法进行随机生产模拟。

场景3：原系统中加入100MW光伏，采用本文方法进行随机生产模拟。

场景4：原系统中加入100MW光伏，光伏出力采用负的负荷模型从原负荷曲线中减去，然后进行随机生产模拟。

表7 随机生产模拟计算结果

项目	场景1	场景2	场景3	场景4
EENS/MWh	1301	1140.38	1138.67	1084.94
LOLP	0.001172	0.000897	0.000855	0.000761
光伏总发电量/GWh	0	175.721	177.326	216.051
总燃料成本/ $\times 10^4$ \$	11851.43	11755.62	11744.19	11711.06
总环境成本/ $\times 10^4$ \$	7887.39	7794.32	7788.34	7767.66
总缺电成本/ $\times 10^4$ \$	7.806	6.842	6.832	6.51

由表7可以看出：

① 与场景1相比，场景2、3、4的EENS、LOLP降低，说明光伏系统有助于提高系统可靠性。

② 场景2与场景3的各项指标值相近，验证

了两种多状态模型所得结果的一致性。

③ 场景2、3的各项指标值相差不多,而场景4与场景2、3相比有较大差别,这是因为场景4采用负值负荷模型,没有计入光伏元件故障因素,所得结果过于乐观。

4.4 效益评估

比较场景1和场景3的成本,可以得到 ΔC_{fuel} 、 ΔC_{env} 、 ΔC_{EENS} ,在场景1的基础上,加入常规机组,直到可靠性水平与场景3达到一致,此时加入的常规机组的容量即为光伏发电置信容量 C_{ECC} 。

场景3下100MW光伏发电系统一年的容量效益和电量效益计算结果如表8所示。

表8 光伏发电效益

电量效益/ $\times 10^{-4}$ \$	$\Delta C_{\text{fuel}} /$ $\times 10^{-4}$ \$	$\Delta C_{\text{env}} /$ $\times 10^{-4}$ \$	$\Delta C_{\text{EENS}} /$ $\times 10^{-4}$ \$	容量效益/ $\times 10^{-4}$ \$	$C_{\text{ECC}} /$ MW
207.264	107.24	99.05	0.974	152.496	42.3

由表8可以看出,光伏发电置信容量为42.3MW,小于额定容量100MW,说明同常规机组相比光伏并网对系统的贡献度较小,这是由于光伏发电具有随机性,且多数时间不能满出力运行;光伏发电能产生可观的效益,一年的电量效益为 207.264×10^4 \$,单位电量效益11.69 \$/MWh;容量效益为 152.496×10^4 \$,单位容量效益 1.52496×10^4 \$/MW。

5 结 论

① 本文方法和文献[6]方法的随机生产模拟所得结果相似,验证了本文所提方法的准确性。

② 本文将一个光伏逆变器组看做一台并网机组,可以降低建模的复杂性。建立的多状态模型为光伏全天出力的等效,在随机生产模拟时不再昼夜分段,简化了模拟过程。

③ 光伏发电并网后可以提高系统的可靠性。

④ 光伏发电清洁无污染,存在容量效益和电量效益,如本文算例中电量效益为 207.264×10^4 \$,容量效益为 152.496×10^4 \$,100MW光伏系统的置信容量为42.3MW。

参 考 文 献

- [1] 许洪华. 中国光伏发电技术发展研究 [J]. 电网技术, 2007, 31(20): 77-81.
- [2] 王锡凡. 电力系统优化规划 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 125-180.
- [3] 张宏宇, 方鑫, 李碧辉, 等. 含大规模风光电源电力系统随机生产模拟 [J]. 中国电力, 2012, 45(6): 73-76.
- [4] 张节潭, 程浩忠, 胡泽春, 等. 含风电场的电力系统随机生产模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 34-39.
- [5] Jeongie P, Wu L, Jaeseok C, et al. A probabilistic reliability evaluation of a power system including solar/photovoltaic cell generator [C] //Proceedings of Power & Energy Society General Meeting. Calgary, AB, Canada: IEEE, 2009: 1-6.
- [6] 郭旭阳, 谢开贵, 胡博, 等. 计入光伏发电的电力系统分时随机生产模拟 [J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1499-1505.
- [7] 王震, 鲁宗相, 段晓波, 等. 分布式光伏发电系统的可靠性模型及指标体系 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 18-24.
- [8] 黄杰鹏, 李宇红, 倪维斗. 并网风电场可避免费用的计算 [J]. 电网技术, 2006, 30(16): 50-53.
- [9] Probability Methods Subcommittee. IEEE reliability test system [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047-2054.
- [10] The Arizona Meteorological Network. Safford station data and reports [R/OL]. [2014-01-03] <http://cals.arizona.edu/azmet/04.htm>.

收稿日期: 2014-01-03

作者简介:

董 驰(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统随机生产模拟、电力系统运行分析与控制, E-mail: 912027127@qq.com;

李燕青(1974—), 男, 教授, 研究方向为电力系统运行分析与控制、电气设备在线监测与故障诊断, E-mail: hdlyq@163.com。

(责任编辑: 杨秋霞)