

光伏发电在微电网中接入及动态特性研究

周念成, 闫立伟, 王强钢

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

摘要: 在光伏发电动态模型的基础上, 针对光伏发电输出功率的波动性, 研究了微电网中的光伏电源的接入问题; 提出了采用光伏电源的平均输出功率计算储能设备容量的优化配置方法, 以实现微电网中光伏微电源的即插即用; 分析了光伏逆变器输出的谐波电流畸变率随光照强度变化波动情况; 利用 PSCAD/EMTDC 软件进行仿真验证, 结果表明该方法能有效平抑光伏发电功率的波动, 同时能减小微电网从并网到孤岛过渡过程的频率波动。

关键词: 微电网; 光伏发电; 储能设备; 微型燃气轮机; 滤波

Research on dynamic characteristic and integration of photovoltaic generation in microgrids

ZHOU Nian-cheng, YAN Li-wei, WANG Qiang-gang

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University),
Chongqing 400044, China)

Abstract: This paper studies the integration problem for the fluctuations of PV source output power, based on the dynamic model of photovoltaic generation. Optimizing the capacity configuration of energy storage device, making use of the average output power of PV source, for its plug and play in microgrids. The THD of PV inverter output current harmonic is analyzed with light intensity changing. PSCAD/EMTDC software is used for simulation and verification, the results show that the method proposed could effectively inhibit the output power fluctuations of PV generator, and reduce the frequency fluctuations of microgrid from the grid-connected mode to the islanding model.

This work is supported by National Natural Science Foundation of Chongqing(No.CSTC2009BB6190).

Key words: microgrid; photovoltaic generation; energy storing device; micro-turbine; filter

中图分类号: TM615; TM727 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0119-09

0 引言

分布式发电(DG)由于具有污染少、能源利用效率高、安装地点灵活等多方面优点得以快速发展,但是大量DG接入电网也产生了一些不良影响。作为新能源接入的一种解决方案,学者们在本世纪初提出了微电网的概念^[1]。微电网从系统观点将发电机、负荷、储能装置及控制装置等结合,形成一个单一可控的单元,同时向用户供给电能和热能。微电网中的电源多为微电源,亦即含有电力电子界面的小型机组(小于100 kW),包括微型燃气轮机、燃料电池、光伏电池、风力发电机等。微电网既可

与大电网联网运行,也可在电网故障或需要时与主网断开单独运行。光伏发电(PV)具有可再生、无污染、安装方便,且技术成熟,必将成为微电网中重要的微电源。

国内外的专家学者对光伏发电做了大量研究。并网光伏发电一般采用MPPT方式,独立光伏发电需要加入储能装置,光伏发电具有波动性,对并网和独立光伏系统都有影响^[2-3]。微电网中含多种不同源特性的分布式电源,既需要并网运行又能独立运行,因此研究光伏发电在微电网中的接入方式及动态特性,对微电网应用和研究具有重要意义。在文献[4]中,分布式电源采用统一的电力电子接口和储能设备接入微电网,并提出了蓄电池容量的选择方法,但主要针对具有可调功率的微电源,对具有随机波动性的光伏电源很难确定上升和下降率。文献[5]通过仿真研究了不同分布式电源配置的微电

基金项目: 重庆市自然科学基金(CSTC2009BB6190); 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512709208)

网的动态行为，重点研究了储能设备在微电网运行控制中的作用，文中光伏发电系统采用单级逆变电路直接并网，也没有考虑光伏电源输出功率的波动。本文研究了微电网中光伏发电接入方式，根据光伏发电功率不稳定的特性，提出了储能设备容量配置方法；针对逆变器产生谐波问题，提出逆变器输出端加入 RC 滤波，减小输出的谐波畸变率；并利用 PSCAD/EMTDC 软件进行了仿真验证。

1 光伏发电模型及波动特性

光伏发电模型由光伏阵列和逆变器组成，图 1 是光伏电池单元的等效电路模型^[6-7]。由基尔霍夫电流定律得到光伏电池输出电流 I 如式 (1)：

$$I = I_L - I_d - I_{sh} = I_L - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中： V 、 I 为光电池输出端电压、电流； I_{sh} 为光电池漏电流； R_{sh} 为旁路电阻； I_L 为光电池短路电流； I_d 为二极管电流； I_0 为二极管饱和电流； q 为库仑常数 ($q=1.6 \times 10^{-19}C$)； R_s 为光电池等效串联电阻； n 为结常数； k 为波尔兹曼常数 ($k=1.38 \times 10^{-23}J/K$)； T 为光电池温度。

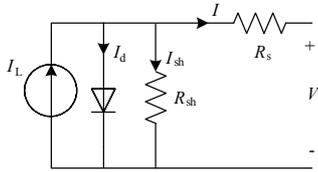


图1 光伏电池等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of PV cell

其中光电池短路电流 I_L 取决于光照强度 S 和温度 T ，而二极管的饱和电流 I_0 仅与温度 T 有关。

$$I_L = I_{Lref} \cdot \left[\frac{S}{1000} + \frac{J}{100} \cdot (T - T_{ref}) \right] \quad (2)$$

$$I_0 = A_T \cdot T^3 \cdot \exp\left[\frac{-1.16 + 7.02 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{T^2}{T - 1108}\right)}{n \cdot k \cdot T} \right] \quad (3)$$

对于实际系统的光伏阵列，可采用受控电流源作为模型，串联 N_s 和并联 N_p 个光电池组件的光伏阵列输出电流 I_A 如式 (4)：

$$I_A = N_p \cdot I_L - N_p \cdot I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot (V_A + I_A \cdot R_s)}{N_s \cdot n \cdot m \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

为保证在一定的光照强度和温度下，光伏阵列工作于最大功率运行点，必须使光伏阵列工作在适当的电压下，因此需要进行最大功率点跟踪。最大

功率点跟踪 (MPPT) 的算法主要有定电压跟踪法 (CVT)、电流扫描法、扰动观察法、电导增量法等^[8]。本文采用电导增量法，其通过比较光伏阵列的瞬时电导和电导的变化量来实现最大功率跟踪。由于光伏逆变电源中功率开关器件的容量有限，本文在光伏电源的建模中通过给定了逆变器的交、直流电流参考值的上下限，来限制逆变器的故障电流，所以即使在短路故障时，故障电流仅为逆变器正常工作电流的2倍左右。

由于光伏发电的控制采用最大功率点跟踪控制策略，光伏发电的输出功率直接决定于光照强度，而光照强度在一天里随着时间和天气等因素的变化不是一个稳定值，所以光伏发电的输出功率是随着光照强度的变化而波动的。图2为某地晴转多云天气下光照强度的变化曲线，由图可知光伏发电输出的功率很不稳定。太阳能光伏发电系统通过光伏组件将太阳能转化为直流电能，再通过并网型逆变器将直流电能转化为与电网同频率、同相位的正弦波电流并入电网，将直流电能经逆变转换为交流电能的过程中会产生谐波^[9]。

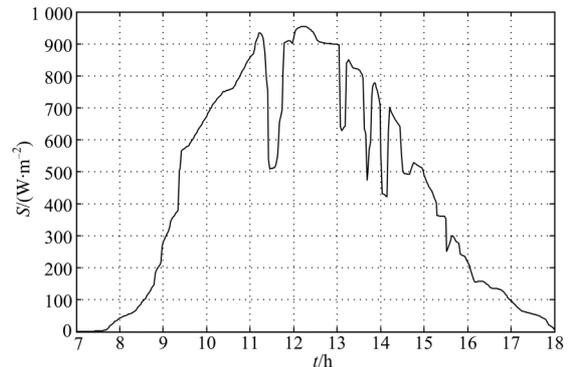


图2 某地晴转多云天气下光照强度变化曲线

Fig.2 Light intensity curve of sunny to cloudy day in someplace

2 微电网中光伏发电的接入及储能设备容量选择

2.1 微电网中光伏发电与其他电源的配合

微电网中通常含有多种能源形式的电源，由于光伏发电具有波动性和不可调节性，所以微电网中光伏发电需要与其他可调功率电源（如微型燃气轮机、燃料电池和小型水力发电机等）配合。本文以微型燃气轮机为例分析。

图3所示为微型燃气轮机的速度/负荷控制模型，图4所示为微型燃气轮机燃料控制模型^[10]。采用同步发电机的分轴结构微型燃气轮机系统，其斜率控制是通过微型燃气轮机调速器实现的。其转速控制是通过改变燃料量来实现的，采用比例-积分

能大于一天总的充电电能，由式 (10) 可知储能设备的容量为：

$$\int_0^T P_s dt = \int_0^T P_{s-f} = \sum_{i=0}^K (P_{opt} - P(k)) \frac{T}{N} \quad (14)$$

当 $P_c < P_{opt}$ 时，此时储能设备一天总的充电的电能大于一天总的放电电能，由式 (11) 可知储能设备的容量为：

$$\int_0^T P_s dt = \int_0^T P_{s-c} = \sum_{i=0}^M (P(m) - P_{opt}) \frac{T}{N} \quad (15)$$

通过以上分析可知，当 $P_c = P_{opt}$ 时，储能设备的容量达到最小，并且可以使得光伏电池和储能设备输出的功率为一平滑值。储能设备采用跟踪控制模式，在微电网从并网向孤岛转换过渡过程中的较短时间内，增大 P_c 使得储能设备快速放电，这时可以短时增大微电网电源容量，减小切换过程中的频率波动。

2.3 光伏逆变器谐波分析

光伏发电系统通过光伏阵列将太阳辐射能转化为直流电能，再通过并网逆变器将直流电变换为与电网同频率、同相位的交流电。在直流电能逆变为交流电能的过程中，电力电子接口将产生电压电流谐波，电压源型逆变电源的输出电流波形不仅与采用的 SPWM 方法有关，而且还受逆变器开关频率、负载参数等因素的影响，因此，电流的分析不易得出一致的数学分析式。但对于具体单次谐波的比重来说，仍然是以奇次谐波为主。光伏逆变器后端采用 LC 滤波器，通过合理设计电感电容参数，对高次谐波构成低阻抗旁路，滤除三相逆变桥的电压电流谐波。为保证逆变电源运行性能评价的客观性，一般采用谐波畸变率作为考察的主要指标。

$$\text{由于 } THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^M I_h^2}}{I_1} \times 100\% \text{, 所以当低光}$$

照时，由于基波电流小，所以谐波畸变率比较大。

3 仿真分析

本文采用图6所示的微电网结构，光照强度采用如图2所示的光照强度变化曲线(具体数据见附录)，其他电源为分轴结构的微型燃气轮机，采用旋转接口接入微电网。储能设备、光伏电源和微型燃气轮机以及本地负荷构成微电网，微电网通过公共接入点与公共电网相连。

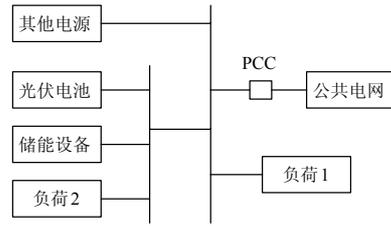


图6 本文所研究的微电网结构

Fig.6 Structure of the studied microgrid

3.1 储能设备容量的计算及作用

以某地三天光照强度的变化曲线图为例，图7为光伏电池在这三种天气情况下输出的功率曲线。 $P_{sunny}(t)$ 为晴天光伏电源输出功率曲线， $P_{cloudy}(t)$ 为晴转多云光伏电源输出功率曲线， $P_{rainy}(t)$ 为雨天光伏电源输出功率曲线。根据式 (9) 可求出在这三种天气情况下的平均功率分别为 5.078 5 kW、4.430 3 kW 和 0.982 5 kW，再由式 (11) ~ (13) 求得相应的储能设备容量，分别是 14.362 kWh、12.913 kWh 和 3.808 kWh。可知晴天条件下所需的容量最大，选择该值为储能设备容量。

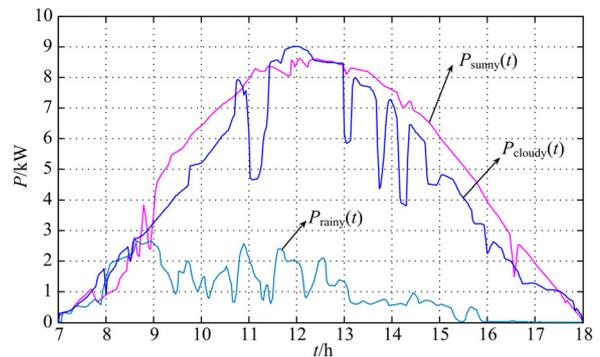


图7 某地三种天气情况下光伏电池功率输出曲线

Fig.7 Power curve of photovoltaic generation in three kinds of weather in someplace

晴转多云天气条件下的仿真分析中，在 3.5 s 时微电网与大电网断开，此时光伏电源的输出功率波形如图 5 (仿真时间为 40 s)，图 8 为孤岛过程中系统频率的变化曲线，图 9 为不同情况下微型燃气轮机的输出功率波形。图中用 \circ 标识的曲线对应于未加储能设备的情况，用 \square 标识表示储能设备接入的情况。由图 9 可知未加储能设备时，光伏电源的功率波动以及孤岛切换时的功率缺额全部由微型燃气轮机承担；储能设备接入后，光伏电源的波动由储能设备补偿，微型燃气轮机仅在孤岛运行时增加出力。本文提出的储能装置的接入方式，能够有效平抑光伏电源的功率波动，还使孤岛运行时微电网的频率波动减小，弥补了微型燃气轮机调节速度慢

的缺点,且在孤岛切换过程中微电网频率出现小幅波动后稳定至额定频率。

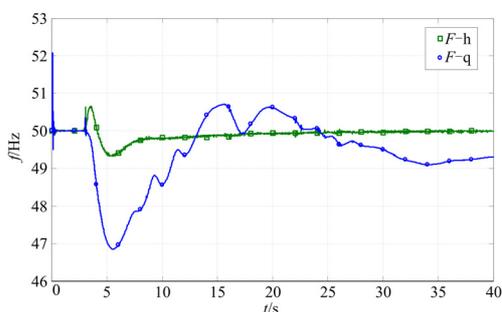


图8 从并网到孤岛过程中系统频率波形

Fig.8 Frequency curve from grid-connected mode to islanding model

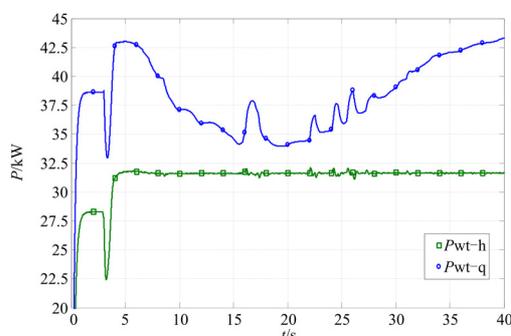


图9 从并网到孤岛过程中微型燃气轮机输出功率

Fig.9 Power curve of micro-turbine from grid-connected mode to islanding model

3.2 光伏逆变器谐波仿真分析

本文滤波器采用的 LC 滤波器的具体参数值为 $L=0.007$ H, $C=10$ μ F。图 10 所示为电流谐波畸变率随着光照强度的改变而变化的曲线。由图可以看出,在低光照时光伏逆变器输出的谐波畸变率较大。

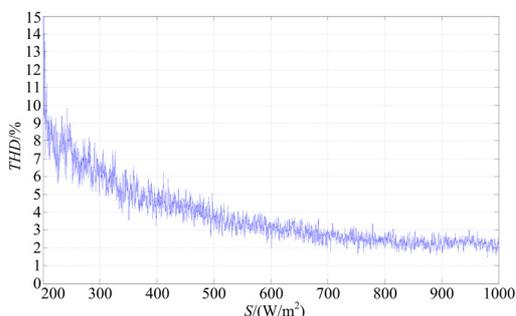


图10 电流谐波畸变率随着光照强度改变的变化曲线

Fig.10 THD of curve harmonic with the light intensity changing

4 结论

光伏发电具有可再生、无污染和安装方便的

优势,必将成为微电网中重要的微电源。由于光伏发电系统的输出功率波动特性,与慢速调节电源存在配合问题。本文针对光伏电源的波动性,研究了微电网中光伏电源的接入,采用交流耦合配置储能设备来抑制光伏电源的功率波动。采用光伏电池输出的平均功率来确定储能设备的容量,研究表明优化配置的储能设备容量,能有效平抑光伏电源的功率波动,使从并网到孤岛运行时微电网的频率波动减小,实现光伏微电源的“即插即用”。仿真结果表明,在低光照下光伏逆变器输出的谐波畸变率较大。

参考文献

- [1] Lasseter R H, Paigi P. Microgrid: a conceptual solution[C].//Proceedings of IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen(Germany): 2004: 4285-4290.
- [2] 李晶, 许洪华, 赵海翔, 等. 并网光伏电站动态建模及仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (24): 83-86.
LI Jing, XU Hong-hua, ZHAO Hai-xiang, et al. Dynamic modeling and simulation of the grid connected PV power station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (24): 83-86.
- [3] 任柱, 陈渊睿, 张淼, 等. 独立光伏系统中蓄电池充电控制策略[J]. 控制理论及应用, 2008, 25 (2): 361-363.
REN Zhu, CHEN Yuan-ru, ZHANG Miao, et al. Battery charge control strategy in stand-alone photovoltaic system[J]. Control Theory & Applications, 2008, 25 (2): 361-363.
- [4] Nikkhajoei H, Lasseter R H. Distributed generation interface to the CERTS microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24 (3): 1598-1608.
- [5] 郭力, 王成山. 含多种分布式电源的微网动态仿真[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (2): 82-85.
GUO Li, WANG Cheng-shan. Dynamical simulation on micro grid with different types of distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (2): 82-85.
- [6] Chenni R, Makhoul M, Kerbache T, et al. A detailed modeling method for photovoltaic cells[J]. Energy, 2007, 32 (9): 1724-1730.
- [7] Kim S K, Jeon J H, Cho C H, et al. Modeling and simulation of a grid-connected PV generation system for electromagnetic transient analysis[J]. Solar Energy, 2009, 83 (5): 664-678.
- [8] 周林, 武剑, 栗秋华, 等. 光伏阵列最大功率点跟踪控制方法综述[J]. 高电压技术, 2008, 34 (6): 1145-1154.

ZHOU Lin, WU Jian, LI Qiu-hua, et al. Survey of maximum power point tracking techniques for photovoltaic array[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34 (6) : 1145-1154.

[9] 张国荣, 张铁良, 丁明, 等. 光伏并网发电与有源电力滤波器的统一控制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (8) : 61-65.

ZHANG Guo-rong, ZHANG Tie-liang, DING Ming, et al. Combined control of active power filter and PV grid

connected generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (8) : 61-65.

[10] 孙可, 韩祯祥, 曹一家. 微型燃气轮机系统在分布式发电中的应用研究[J]. 机电工程, 2005, 22(8): 55-59.

SUN Ke, HAN Zhen-xiang, CAO Yi-jia. Research on the application of microturbine system in distributed generation[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2005, 22 (8) : 55-59.

附录：三种天气情况下的光照强度数据

时间 /h	晴天 /(W/m ²)	晴转多云 /(W/m ²)	雨天 /(W/m ²)	时间 /h	晴天 /(W/m ²)	晴转多云 /(W/m ²)	雨天 /(W/m ²)	时间 /h	晴天 /(W/m ²)	晴转多云 /(W/m ²)	雨天 /(W/m ²)
7.00	2.49	0.00	0.00	10.69	774.76	780.50	163.76	14.37	643.34	656.57	38.22
7.03	2.49	0.13	16.68	10.71	778.43	787.33	114.11	14.40	636.89	650.97	30.78
7.06	2.49	0.26	33.36	10.74	782.10	794.17	100.96	14.43	630.43	645.37	25.68
7.08	2.49	0.38	47.33	10.77	786.90	801.01	87.82	14.45	623.97	639.77	21.68
7.11	2.49	0.51	54.01	10.80	791.82	808.03	122.42	14.48	617.51	557.43	21.68
7.14	2.49	0.64	60.24	10.82	796.75	815.17	211.36	14.51	611.06	504.45	21.68
7.17	2.49	0.77	59.59	10.85	801.67	822.30	248.89	14.54	604.60	494.42	21.68
7.19	2.49	0.89	58.93	10.88	806.59	829.44	280.40	14.56	598.14	493.86	21.68
7.22	2.49	1.02	58.28	10.91	811.52	836.57	278.34	14.59	591.63	493.31	21.68
7.25	2.49	1.15	57.63	10.93	818.98	843.71	276.27	14.62	585.13	492.75	21.68
7.28	2.49	1.28	56.97	10.96	828.71	850.85	271.84	14.65	578.62	492.19	21.68
7.30	2.49	1.42	57.37	10.99	837.66	855.88	263.08	14.67	572.12	492.73	21.68
7.33	2.49	1.57	69.73	11.02	842.95	860.42	232.03	14.70	565.61	505.89	21.68
7.36	2.49	1.71	82.09	11.04	848.23	864.96	233.69	14.73	559.12	519.05	21.68
7.39	2.49	1.85	83.06	11.07	856.62	869.49	235.36	14.76	552.67	528.92	21.68
7.41	4.00	2.00	82.33	11.10	865.68	884.86	237.03	14.78	546.22	526.41	21.68
7.44	7.27	2.14	81.61	11.13	874.74	903.63	238.70	14.81	539.77	523.89	22.12
7.47	10.54	2.28	80.88	11.15	879.66	913.96	240.37	14.84	533.33	521.37	22.83
7.50	13.80	2.42	80.15	11.18	877.21	924.29	237.96	14.87	526.88	518.86	23.55
7.52	17.07	2.58	79.42	11.21	874.77	934.61	234.63	14.89	520.43	516.34	24.26
7.55	20.34	2.99	78.69	11.24	872.32	934.76	231.29	14.92	513.98	513.83	24.98
7.58	23.61	3.40	81.99	11.26	872.08	930.06	221.32	14.95	507.53	511.31	25.45
7.61	26.88	3.81	86.85	11.29	872.08	919.11	202.70	14.98	499.67	501.55	24.54
7.63	31.06	4.22	91.71	11.32	872.08	907.51	170.55	15.00	490.32	490.31	23.63
7.66	35.42	4.62	96.57	11.35	883.35	866.19	112.26	15.03	480.98	479.06	22.72
7.69	39.77	5.03	101.43	11.37	890.48	791.03	112.92	15.06	471.63	467.82	21.81
7.72	44.12	8.81	106.29	11.40	888.92	751.55	123.63	15.09	462.28	460.02	18.82
7.74	48.47	13.51	103.20	11.43	887.36	539.43	134.34	15.11	452.93	453.49	15.49
7.77	51.80	17.59	97.33	11.46	885.80	508.10	145.05	15.14	443.59	446.96	12.15
7.80	54.40	20.99	91.47	11.48	883.96	509.20	155.76	15.17	434.24	440.43	11.01
7.83	57.01	24.39	85.60	11.51	880.77	510.31	173.01	15.20	426.78	433.27	11.30
7.85	59.61	27.79	143.68	11.54	877.58	511.41	193.59	15.22	419.58	423.90	11.58
7.88	62.21	30.86	160.36	11.57	874.39	512.52	218.48	15.25	412.39	414.53	11.87

续上表

时间 /h	晴天 /(W/m ²)	晴转多云 /(W/m ²)	雨天 /(W/m ²)	时间 /h	晴天 /(W/m ²)	晴转多云 /(W/m ²)	雨天 /(W/m ²)	时间 /h	晴天 /(W/m ²)	晴转多云 /(W/m ²)	雨天 /(W/m ²)
7.91	64.82	33.61	177.84	11.59	871.20	523.05	235.03	15.28	405.20	405.16	12.15
7.94	67.42	36.36	197.86	11.62	868.01	544.74	242.34	15.31	398.01	362.95	12.43
7.96	70.02	39.11	217.88	11.65	864.82	566.42	249.65	15.33	390.82	362.58	12.04
7.99	75.10	41.38	228.90	11.68	861.63	654.83	243.50	15.36	383.16	362.20	10.98
8.02	82.17	43.28	231.31	11.70	858.44	674.03	191.63	15.39	375.04	361.83	9.91
8.05	89.25	45.18	233.73	11.73	855.25	693.63	154.80	15.42	366.92	361.45	8.84
8.07	96.32	47.08	236.14	11.76	871.77	799.91	154.10	15.44	358.80	361.08	7.77
8.10	102.57	48.98	238.55	11.79	918.23	903.20	153.40	15.47	350.67	360.70	6.71
8.13	107.63	50.88	240.97	11.81	896.65	904.94	152.70	15.50	342.55	353.35	5.64
8.16	112.68	52.40	243.33	11.84	889.61	906.67	151.99	15.53	334.43	250.77	5.23
8.18	117.73	53.86	245.62	11.87	901.25	908.41	151.93	15.55	325.09	262.61	4.81
8.21	122.78	55.31	247.91	11.90	912.90	910.14	159.88	15.58	272.54	274.44	4.40
8.24	127.83	56.76	250.20	11.92	914.96	908.37	167.82	15.61	219.98	286.28	3.99
8.27	133.02	58.21	252.49	11.95	908.52	902.57	172.06	15.64	181.93	298.11	3.57
8.29	138.30	59.66	254.78	11.98	902.09	900.54	169.26	15.66	250.51	299.91	3.16
8.32	139.15	61.11	257.07	12.01	895.66	920.14	166.46	15.69	295.42	293.44	2.75
8.35	125.34	63.68	259.36	12.03	889.23	939.75	162.92	15.72	289.95	286.97	2.33
8.38	111.54	68.38	261.65	12.06	890.67	945.07	152.32	15.75	284.49	282.73	1.92
8.40	97.73	73.07	281.76	12.09	910.03	947.49	141.73	15.77	279.02	279.54	1.51
8.43	98.40	77.77	305.72	12.12	910.78	949.91	104.11	15.80	273.56	276.36	1.10
8.46	103.37	82.46	302.38	12.14	911.54	952.32	94.03	15.83	268.09	243.94	0.68
8.49	108.33	87.16	299.05	12.17	912.30	953.93	92.46	15.86	262.63	241.60	0.27
8.51	113.30	91.84	295.71	12.20	913.05	953.93	90.89	15.88	256.33	239.26	0.00
8.54	118.26	96.38	293.63	12.23	913.81	953.93	89.32	15.91	248.79	236.92	0.00
8.57	123.23	100.91	295.69	12.25	912.16	953.93	87.75	15.94	241.24	234.58	0.00
8.60	126.06	105.45	297.76	12.28	910.25	953.93	90.62	15.97	233.69	228.70	0.00
8.62	128.79	109.99	299.82	12.31	908.33	951.98	93.95	15.99	226.43	220.63	0.00
8.65	131.52	116.40	301.89	12.34	906.41	949.18	97.29	16.02	220.11	212.55	0.00
8.68	134.25	122.83	303.95	12.36	905.92	946.39	99.74	16.05	213.78	204.47	0.00
8.71	136.99	129.26	300.60	12.39	905.92	943.60	96.51	16.08	207.45	192.86	0.00
8.73	139.72	135.69	295.64	12.42	905.92	940.80	93.29	16.10	201.12	179.37	0.00
8.76	143.02	142.12	290.68	12.45	905.92	938.01	90.06	16.13	194.80	165.88	0.00
8.79	162.93	148.54	285.72	12.47	905.58	930.12	88.05	16.16	188.47	155.67	0.00
8.82	179.80	184.52	280.76	12.50	903.62	922.11	89.99	16.19	182.11	156.10	0.00
8.84	186.66	191.12	259.55	12.53	901.65	915.00	91.92	16.21	175.69	156.52	0.00
8.87	193.53	197.71	220.52	12.56	899.69	908.48	93.86	16.24	169.27	156.95	0.00
8.90	200.39	204.31	213.75	12.58	897.73	907.37	95.79	16.27	162.85	157.37	0.00
8.93	207.25	210.90	206.97	12.61	895.77	906.26	97.73	16.30	156.43	157.80	0.00
8.95	251.74	217.50	200.13	12.64	893.81	905.15	99.66	16.32	150.01	158.23	0.00
8.98	242.68	270.31	190.32	12.67	891.85	904.04	101.84	16.35	143.90	158.65	0.00
9.01	248.85	284.74	180.51	12.69	875.09	902.92	104.11	16.38	138.08	156.44	0.00
9.04	288.82	291.94	163.61	12.72	862.90	902.42	106.38	16.41	132.26	153.20	0.00

续上表

时间 /h	晴天 /(W/m ²)	晴转多云 /(W/m ²)	雨天 /(W/m ²)	时间 /h	晴天 /(W/m ²)	晴转多云 /(W/m ²)	雨天 /(W/m ²)	时间 /h	晴天 /(W/m ²)	晴转多云 /(W/m ²)	雨天 /(W/m ²)
9.06	328.79	299.13	145.06	12.75	870.09	902.04	102.31	16.43	126.44	149.97	0.00
9.09	289.84	306.33	126.52	12.78	877.28	901.65	91.52	16.46	120.61	146.73	0.00
9.12	247.34	315.40	128.04	12.80	884.47	901.26	83.96	16.49	114.79	143.49	0.00
9.15	266.44	329.48	145.24	12.83	883.16	900.88	84.92	16.52	113.29	140.26	0.00
9.17	326.13	343.56	201.50	12.86	881.79	900.49	85.88	16.54	113.71	137.02	0.00
9.20	385.81	353.99	199.31	12.89	880.41	900.10	86.84	16.57	114.14	134.44	0.00
9.23	429.43	359.13	197.11	12.91	879.04	899.71	87.80	16.60	114.57	134.44	0.00
9.26	375.79	364.27	197.40	12.94	877.67	899.33	88.77	16.63	115.00	134.44	0.00
9.28	322.16	369.41	219.58	12.97	876.30	898.94	89.73	16.65	115.43	134.44	0.00
9.31	268.52	374.56	241.75	13.00	874.93	898.55	90.69	16.68	107.24	134.44	0.00
9.34	292.77	379.70	232.70	13.02	873.56	898.17	89.69	16.71	97.83	134.18	0.00
9.37	353.64	503.42	213.96	13.05	872.18	897.78	87.43	16.74	88.41	132.39	0.00
9.39	414.51	509.90	176.53	13.08	870.81	640.38	85.16	16.76	95.06	130.60	0.00
9.42	475.37	565.69	163.39	13.11	868.20	629.03	87.53	16.79	102.25	128.81	0.00
9.45	501.67	568.45	150.24	13.13	864.18	633.57	98.32	16.82	109.44	127.01	0.00
9.48	510.56	571.21	137.17	13.16	860.16	638.26	109.12	16.85	110.60	123.40	0.00
9.50	519.44	573.98	135.64	13.19	856.14	642.95	119.91	16.87	105.88	117.96	0.00
9.53	528.32	576.74	151.99	13.22	852.12	839.76	130.70	16.90	101.16	112.53	0.00
9.56	537.20	579.50	168.33	13.24	847.32	846.94	123.82	16.93	96.43	107.24	0.00
9.59	544.60	582.26	184.68	13.27	842.27	850.11	115.72	16.96	91.71	103.50	0.00
9.61	551.94	586.97	175.18	13.30	837.22	842.22	105.68	16.98	86.99	99.77	0.00
9.64	559.27	593.26	139.05	13.33	832.17	834.34	91.54	17.01	82.26	96.03	0.00
9.67	574.46	599.55	104.81	13.35	827.12	826.45	94.38	17.04	78.84	92.29	0.00
9.70	592.58	605.83	112.88	13.38	822.07	824.47	97.23	17.07	77.04	88.56	0.00
9.72	595.55	612.12	134.09	13.41	819.47	823.47	100.07	17.09	75.25	84.82	0.00
9.75	598.52	618.40	155.31	13.44	817.00	822.46	102.92	17.12	73.45	81.08	0.00
9.78	601.49	624.69	169.37	13.46	814.54	821.45	102.06	17.15	71.65	77.35	0.00
9.81	604.46	630.97	176.61	13.49	812.08	820.45	99.94	17.18	69.85	73.61	0.00
9.83	607.43	637.12	183.86	13.52	809.61	818.50	97.81	17.20	68.06	69.87	0.00
9.86	610.40	643.15	191.11	13.55	807.15	810.49	95.69	17.23	66.21	66.14	0.00
9.89	616.07	649.17	195.78	13.57	804.69	802.48	92.30	17.26	64.32	64.09	0.00
9.92	622.11	655.19	199.56	13.60	796.73	790.98	87.39	17.29	62.44	63.16	0.00
9.94	628.15	661.21	203.34	13.63	782.60	633.90	84.12	17.31	60.55	62.22	0.00
9.97	635.89	667.23	207.12	13.66	768.47	618.72	85.86	17.34	58.66	61.28	0.00
10.00	646.00	673.50	216.50	13.68	754.34	474.13	87.59	17.37	56.78	60.35	0.00
10.03	656.10	680.54	192.64	13.71	749.48	495.83	89.33	17.40	54.89	59.41	0.00
10.05	663.40	687.58	174.37	13.74	755.72	568.99	86.88	17.42	53.00	58.47	0.00
10.08	668.04	694.63	98.79	13.77	761.96	591.74	84.41	17.45	51.11	57.54	0.00
10.11	672.68	701.67	95.99	13.79	768.20	741.28	81.95	17.48	49.23	56.60	0.00
10.14	677.32	708.71	93.19	13.82	774.44	764.36	79.48	17.51	47.34	55.66	0.00
10.16	681.97	714.38	142.18	13.85	761.32	777.32	77.01	17.53	45.55	54.72	0.00
10.19	686.61	718.77	207.67	13.88	741.69	776.28	74.34	17.56	43.89	53.79	0.00

续上表

时间 /h	晴天 /(W/m ²)	晴转多云 /(W/m ²)	雨天 /(W/m ²)	时间 /h	晴天 /(W/m ²)	晴转多云 /(W/m ²)	雨天 /(W/m ²)	时间 /h	晴天 /(W/m ²)	晴转多云 /(W/m ²)	雨天 /(W/m ²)
10.22	691.25	723.17	257.76	13.90	737.98	764.21	58.77	17.59	42.22	52.85	0.00
10.25	695.89	727.57	275.11	13.93	735.15	752.13	47.25	17.62	40.56	51.91	0.00
10.27	701.86	731.96	290.25	13.96	732.32	732.54	37.48	17.64	38.89	50.67	0.00
10.30	707.98	736.36	292.07	13.99	729.48	707.90	33.11	17.67	37.23	48.53	0.00
10.33	714.10	740.76	275.39	14.01	725.84	553.62	28.74	17.70	35.56	46.39	0.00
10.36	720.22	745.15	258.71	14.04	720.88	432.69	24.37	17.73	33.90	44.25	0.00
10.38	726.34	749.55	243.22	14.07	715.91	430.27	23.96	17.75	28.87	42.11	0.00
10.41	731.46	751.10	228.30	14.10	710.95	427.86	29.84	17.78	23.74	39.98	0.00
10.44	736.27	752.46	212.30	14.12	705.98	425.45	38.37	17.81	18.90	37.84	0.00
10.47	741.09	753.81	195.03	14.15	701.02	423.03	58.09	17.84	18.62	28.69	0.00
10.49	745.91	755.16	180.71	14.18	694.68	627.55	70.69	17.86	18.33	20.75	0.00
10.52	750.73	756.51	175.11	14.21	687.28	701.62	76.76	17.89	18.05	18.81	0.00
10.55	755.55	757.87	169.51	14.23	679.88	692.90	78.69	17.92	17.77	16.88	0.00
10.58	760.06	759.22	163.71	14.26	672.48	684.17	74.91	17.95	17.49	14.94	0.00
10.60	763.74	760.57	85.31	14.29	665.07	675.45	71.13	17.97	17.21	11.89	0.00
10.63	767.41	766.82	108.55	14.32	657.67	667.78	67.35	18.00	16.92	5.12	0.00
10.66	771.08	773.66	136.16	14.34	650.27	662.17	47.74				

收稿日期: 2009-08-31; 修回日期: 2010-06-11

作者简介:

周念成 (1969-), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统自动化和电能质量方面的教学和研究工作;

闫立伟 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化和电能质量; E-mail: ylwfly@yahoo.com.cn

王强钢 (1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化和电能质量。

(上接第 11 页 continued from page 11)

[14] Francisco G, Santos F, Medeiros E B, et al. Fault diagnosis system for power systems based on coloured Petri nets[C].//The 12th Latin-American Congress on Automatic Control. Salvador(Brazil): 2006: 3-6.

[15] 蔡宏盈. 应用彩色Petri网专家系统于配电系统故障复电策略之研究(硕士学位论文)[D]. 高雄: 国立中山大学, 2003.

CAI Hong-ying. Study on fault restoration strategy of distribution systems with colored Petri net model, thesis[D]. Gaoxiang: National Sun Yat-sen University, 2003.

[16] 袁崇义. Petri网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

YUAN Chong-yi. Principle and application of Petri net[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.

[17] 文福拴, 韩祯祥. 基于遗传算法和模拟退火算法的电力系统的故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14 (3): 29-35.

WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang. Fault section

estimation in power systems using genetic algorithm and simulated annealing[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14 (3): 29-35.

[18] 左晓铮. 云南电网“99.5.23”220 kV鲁青线事故分析[J]. 继电器, 1999, 27 (6): 44-48.

ZUO Xiao-zheng. Analysis on the event of 220 kV Luqing line of Yunnan power network in May 23 1999[J]. Relay, 1999, 27 (6): 44-48.

收稿日期: 2009-09-01; 修回日期: 2010-03-05

作者简介:

曾庆锋 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为继电保护和电网故障诊断的算法与仿真; E-mail: sharpqq@yahoo.com.cn

何正友 (1970-), 男, 教授, 主要研究方向为现代信号处理和信息理论在电力系统故障分析中的应用、新型继电保护原理、配电网自动化等。E-mail: hezy@swjtu.cn

杨健维 (1982-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统故障诊断; E-mail: yangjianwei0910@163.com