

DOI: 10.7667/PSPC160739

# 基于仿电磁学算法的电压暂降状态估计

付锦, 丁蓝, 苟长松

(四川省电力公司南充供电公司, 四川 南充 637000)

**摘要:** 提出基于仿电磁学(electromagnetism-like mechanism, ELM)算法的高容错性电压暂降状态估计方法。通过抗干扰种群移动模型、自适应变异和精英策略等改进措施提升了仿电磁学算法的整体寻优性能。引入解析法和故障点法确定线路故障区间, 利用冗余配置法确保观测矩阵的非奇异性。采用故障估计值与历史统计值之差构建了电压暂降状态估计模型。通过在 IEEE24 节点标准测试系统上的仿真计算, 并与遗传算法的仿真对比, ELM 在寻优效率和准确性方面具有明显优势。该方法适用于任一电网在对称、不对称故障时的电压暂降状态估计。

**关键词:** 电压暂降状态估计; 电能质量; 仿电磁学算法; 全局优化

## Voltage sag state estimation based on electromagnetism-like mechanism

FU Jin, DING Lan, GOU Changsong

(Sichuan Electric Power Corporation Nanchong Power Supply Company, Nanchong 637000, China)

**Abstract:** Based on electromagnetism-like mechanism (ELM) algorithm, a high fault-tolerant method for voltage sag state estimation is proposed. In this paper, the global optimization performance of the electromagnetic simulation algorithm is improved by the improvement of the anti disturbance population movement model, the adaptive mutation and the elite strategy. The analytic method and fault point method are introduced to determine the interval of line fault, and the redundancy collocation method is used to ensure the non singularity of the observation matrix. A voltage sag state estimation model is constructed by using the difference between the short circuit fault estimation and the historical statistics. Through the IEEE24 node Standard Test System Simulation and comparison with the genetic algorithm simulation, ELM has obvious advantages in the search efficiency and accuracy. This method can be applied to the voltage sag state estimation of a power system with symmetrical and unsymmetrical fault.

**Key words:** voltage sag state estimation; power quality; electromagnetism-like mechanism; global optimization

## 0 引言

随着敏感负荷(可编程控制器、调速电机、计算机、精密加工机械)的迅猛发展及其严格的电能质量要求, 电压暂降问题已引起供电部门和用户的共同关注<sup>[1-2]</sup>。短路故障、开关操作、变压器及电容器组的投切等均能引起电压暂降, 使敏感设备不能获得所需质量的电能。短路故障引起的电压暂降, 虽未造成电源与用电设备之间的电气连接中断, 但由于波及范围广、影响面大, 易中断生产线的连续性工作, 而值得深入研究。

电压暂降的发生是随机事件, 如采用实地监测, 其统计信息的准确性局限于监测仪的监测周期长短。因此, 采用遗传算法(GA)、粒子群(PSO)算法、

云计算等新兴智能优化方法进行电压暂降预估计, 对电压敏感负荷具有很大的工程参考价值<sup>[3-9]</sup>。这些方法均有一定优势, 但存在原理复杂、参数敏感、效率低等问题。因此, 本文首次采用仿电磁学(electromagnetism-like mechanism, ELM)算法来解决所建立的电压暂降状态估计模型, 为该问题提供了新的研究途径。

ELM 模拟了处于静电场内的带电粒子之间库仑力的相互作用机制, 属于随机全局智能优化算法<sup>[5]</sup>。文中通过抗干扰种群移动模型、自适应变异和精英策略等改进措施改善了种群的多样性和分布性, 解决了局部最优和收敛慢的问题, 提高了整体寻优性能。在 IEEE24 节点标准测试系统进行了测试对比, 验证了该算法的有效性。

## 1 ELM 算法

### 1.1 ELM 的基本原理

ELM 具备记忆和反馈机制, 能避免搜索迂回, 能实现全局优化。它在寻优过程中产生的每个带电粒子便是一个潜在的解。其寻优规则为

$$\mathbf{X}_i^{(k+1)} = \mathbf{X}_i^{(k)} + \frac{\omega \mathbf{F}_i^{(k)}}{\|\mathbf{F}_i^{(k)}\|} \mathbf{R}, \quad \omega \in N_{\text{rand}}(0, 1) \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{F}_i^{(k)} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \begin{cases} q_i^{(k)} q_j^{(k)} (\mathbf{X}_j^{(k)} - \mathbf{X}_i^{(k)}) H^2, & f(\mathbf{X}_j^{(k)}) < f(\mathbf{X}_i^{(k)}) \\ q_i^{(k)} q_j^{(k)} (\mathbf{X}_i^{(k)} - \mathbf{X}_j^{(k)}) H^2, & f(\mathbf{X}_j^{(k)}) \geq f(\mathbf{X}_i^{(k)}) \end{cases} \quad (2)$$

$$H = \|\mathbf{X}_j^{(k)} - \mathbf{X}_i^{(k)}\|^{-1} \quad (3)$$

$$q_i^{(k)} = \exp \left( -n \frac{f(\mathbf{X}_i^{(k)}) - f(\mathbf{X}_{\text{best}}^{(k)})}{\sum_{i=1}^m [f(\mathbf{X}_i^{(k)}) - f(\mathbf{X}_{\text{best}}^{(k)})]} \right) \quad (4)$$

$$\mathbf{R} = \begin{cases} \mathbf{U}_i^{(k)} - \mathbf{X}_i^{(k)}, & \mathbf{F}_i^{(k)} > 0 \\ \mathbf{X}_i^{(k)} - \mathbf{L}_i^{(k)}, & \mathbf{F}_i^{(k)} \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $m, n$  分别是种群粒子总数、维数;  $\mathbf{X}_i^{(k)}$  为第  $k$  次迭代中第  $i$  个粒子;  $\mathbf{X}_{\text{best}}^{(k)}$  为最优粒子; 电荷量  $q_i^{(k)}$  表示  $\mathbf{X}_i^{(k)}$  与  $\mathbf{X}_{\text{best}}^{(k)}$  的逼近度, 值越大表明  $\mathbf{X}_i^{(k)}$  越接近  $\mathbf{X}_{\text{best}}^{(k)}$ ;  $\|\cdot\|$  为向量的范数; 总矢量力  $\mathbf{F}_i^{(k)}$  表示  $\mathbf{X}_i^{(k)}$  在种群中受力的大小和性质, 当  $f(\mathbf{X}_j^{(k)}) < f(\mathbf{X}_i^{(k)})$  时,  $\mathbf{X}_j^{(k)}$ 、 $\mathbf{X}_i^{(k)}$  表现为吸引力, 否则为排斥力;  $f(\cdot)$  为评价函数;  $\mathbf{U}_i^{(k)}$ 、 $\mathbf{L}_i^{(k)}$  为  $\mathbf{X}_i^{(k)}$  的上、下限,  $N_{\text{rand}}()$  为随机函数;  $\mathbf{R}$  为约束条件。

### 1.2 改进策略

#### 1.2.1 改进的抗干扰种群移动模型

为消除 ELM 的总矢量力对距离的过分倚重以及邻域搜索行为, 将模型改进为

$$\mathbf{X}_i^{(k+1)} = \mathbf{X}_i^{(k)} + \frac{\omega \mathbf{F}_i^{(k)} H^{-1} \mathbf{R}}{\|\mathbf{F}_i^{(k)} H^{-1}\| + \delta} + \frac{c \chi \mathbf{F}_{ir}^{(k)} H^{-1} \mathbf{R}}{\|\mathbf{F}_{ir}^{(k)} H^{-1}\| + \delta} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{F}_{ir}^{(k)}$  为第  $k$  次迭代中粒子  $i$  对随机粒子  $r$  的作用力;  $c$  为被动聚集因子, 若  $f(\mathbf{X}_r^{(k)}) > f(\mathbf{X}_i^{(k)})$ , 其值为正, 否则为负;  $\chi \in N_{\text{rand}}(0, 1)$ ;  $\delta$  是为避免算法因  $\|\cdot\|$  为零而终止运行的抗干扰因子<sup>[5]</sup>。

#### 1.2.2 自适应变异策略

高斯变异机制可令 ELM 种群获得分布性和多样性, 防止迭代后期陷入局部最优和收敛震荡。

$$\mathbf{X}_i^{(k)'} = \mathbf{X}_i^{(k)} + N(0, d_\sigma^{(k)}) \quad (7)$$

其中

$$d_\sigma^{(k)} = [1 - P(\mathbf{X}_i^{(k)})] \exp(|1 - q_i^{(k)}|) (m + k)^{-1} \quad (8)$$

式中, 高斯噪声  $N(0, d_\sigma^{(k)})$  的均值为 0、方差为  $\sigma$ 。

### 1.2.3 精英策略

为留存种群优良品质和引导寻优方向, 提高收敛效率, 新种群的产生均采用基于矢量矩的概率选择法, 优先选出当前种群中相当量的有较高电荷量的粒子, 并随机补充被剔除的粒子<sup>[5]</sup>。

## 2 VSSE 的基本模型

### 2.1 电压暂降状态估计原理

电压暂降状态估计原理是通过已装监测仪节点量测的电压暂降频次去估计其余节点的暂降频次, 进而获得全网的电压暂降信息<sup>[6-10]</sup>。可表达为

$$\mathbf{H} = \mathbf{M}\mathbf{X} + \boldsymbol{\theta} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{H}$  为量测矩阵, 其中各元素是根据预设的电压阈值由监测仪记录的母线电压暂降频次;  $\mathbf{X}$  为状态变量矩阵, 其中各元素代表某线路故障区间, 其大小等于对应时段该故障区间内的故障频次;  $\mathbf{M}$  为  $\mathbf{H}$  和  $\mathbf{X}$  之间的关系矩阵, 称为系统的观测矩阵<sup>[7]</sup>;  $\boldsymbol{\theta}$  为测量误差, 可忽略不计。

### 2.2 构建量测量矩阵 $\mathbf{H}$

假设电网有  $N$  个节点,  $L$  条支路, 监测仪的数量为  $C$ <sup>[7]</sup>。如前所述, 本文研究的情形为  $C < N$ 。

系统故障时, 第  $C$  个监测仪在阈值电压  $V_1$  下, 可记录到本母线的电压暂降频次  $h_c^i$ , 则量测量矩阵即为  $\mathbf{H}^1 = [h_1^1, h_2^1, h_3^1, \dots, h_c^1]^T$ 。一般地, 根据系统的不同故障情况, 被监测母线应具备  $t$  个阈值电压。因此, 量测量矩阵可记为  $\mathbf{H} = [\mathbf{H}^1, \mathbf{H}^2, \mathbf{H}^3, \dots, \mathbf{H}^t]^T$ 。

### 2.3 构建状态变量矩阵 $\mathbf{X}$

式(9)表明各状态变量对应于线路  $l$  的故障区间, 其数量的多少直接影响暂态估计结果的精度。为说明问题, 设简单系统如图 1 所示<sup>[8]</sup>。 $m_1$ 、 $m_2$  分别为被监测母线、待估计母线; 横轴表示故障线路的百分比; 纵轴表示母线残余电压幅值。

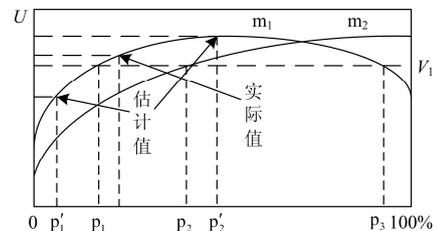


图 1 线路  $l_i$  故障时  $m_1$ 、 $m_2$  上的残余电压

Fig. 1 Bus residual voltage at  $m_1$  and  $m_2$  with failure occurred in line  $l_i$



$$\Delta q^{(k)} = \sum_{i=1}^m \{\max[q_{\text{best}}^{(k)} - q_i^{(k)}, \varepsilon] / m\} \leq \varepsilon \quad (17)$$

### 3.4 求解流程

图 2 中,  $M_{nm}^t$ 、 $H_{nm}^t$  为未安装监测仪的母线的观测矩阵和电压暂降频次。观测矩阵的建立如 2.4 节所述, 不同的是  $M_{nm}^t$  矩阵的行向量代表  $N-C$  个未安装监测仪的母线残压情况。

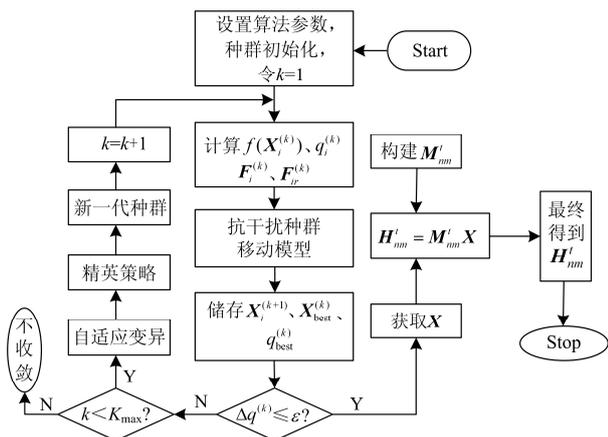


图 2 EML 求解 VSSE 的流程

Fig. 2 Process of multi-objective power network planning

## 4 算例分析

本文的主要测试对象如图 3 所示。系统现有 24 条母线、33 回线路、11 座发电厂、5 台变压器, 系统参数信息与历史故障统计值由文献[6]提供, 文中设定故障类型为三相对称短路, 不对称故障数据参见文献[18]。

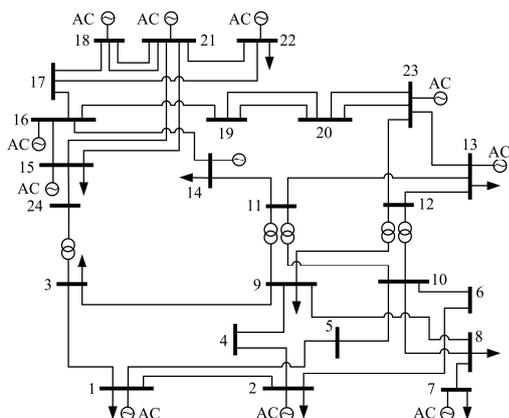
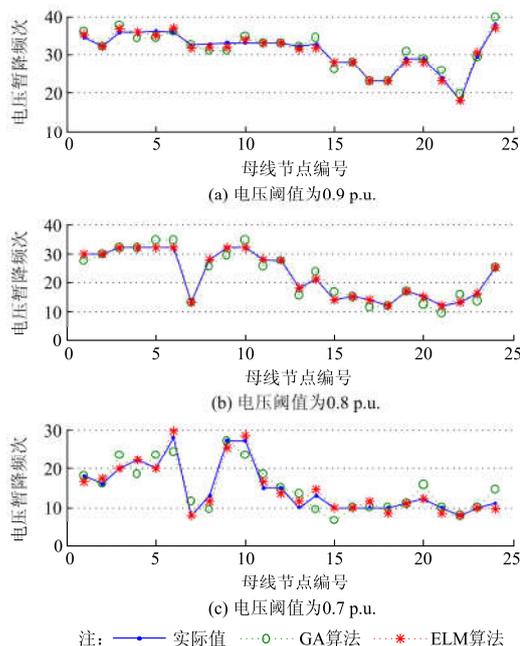


图 3 IEEE24 节点标准测试系统

Fig. 3 IEEE24 node standard test systems

图 4 分别给出了电压阈值为 0.9 p.u.、0.8 p.u.、0.7 p.u.时母线电压暂降频次的实际值和估计值。



注: —●— 实际值 —○— GA算法 —\*— ELM算法

图 4 不同电压阈值下的母线电压暂降频次

Fig. 4 Bus voltage sag frequency under different voltage thresholds

为评估本文估计值的准确性, 定义误差为

$$RE_j(\%) = \left| (NS_{\text{est},j} - NS_{\text{real},j}) / NS_{\text{real},j} \right| \times 100 \quad (18)$$

按照 3.4 节的求解流程, 将 GA 和 ELM 算法的仿真统计结果及误差对比情况列于表 1、表 2。

表 1 系统平均电压暂降频次

Table 1 Average voltage sag frequency in the system

电压阈值/ p.u.	系统平均电压暂降频次			误差(%)	
	实际值	GA	ELM	GA	ELM
0.9	31.46	31.25	31.50	0.67	0.13
0.8	22.29	21.83	22.15	2.06	0.63
0.7	14.25	15.13	14.64	6.18	2.74

表 2 IEEE24 节点仿真结果误差

Table 2 IEEE24 node simulation result error

电压阈值/ p.u.	最大误差(%)		最小误差(%)		平均误差(%)	
	GA	ELM	GA	ELM	GA	ELM
0.9	9.52	4.63	0.82	0.02	3.82	0.62
0.8	39.29	20.17	0.86	0.11	8.61	2.28
0.7	55.56	28.75	0.54	0.19	21.06	7.83

表 1 和表 2 的误差对比结果表明, 利用 ELM 估计出的平均电压暂降频次高度逼近于实际值, 其精度明显优于 GA 算法, 拥有较高的有效性和准确性。

由表 3 可知, ELM 比 GA 需要设定的初始种群规模和迭代次数少, 这明显地节省了存储空间和运行时间, 具有更高的容错性、收敛性和寻优效率。

另外,注意到随着电压阈值降低,平均误差也随之升高<sup>[19-20]</sup>。这是由于阈值设置越低,对应的可监测范围也随之减小,因而评估结果误差将相应增加。

表 3 两种算法在不同系统规模下的性能对比

Table 3 Performance comparison of two algorithms under different systems

算法	GA			ELM		
电压阈值/p.u.	0.9	0.8	0.7	0.9	0.8	0.7
运算次数	20	20	20	20	20	20
系统规模 1		24 节点系统				
种群规模 1	30	40	60	20	20	30
迭代次数 1	60	65	73	20	20	20
收敛次数 1	16	14	10	20	20	20
平均运行时间 1/s	857	884	906	10.7	10	10.2
最优解首次出现 1/代	36	40	43	10	11	10
获优率 1/%	97	90	88	100	100	100
系统规模 2		57 节点系统				
种群规模 2	50	70	100	20	30	50
迭代次数 2	89	86	97	25	26	30
收敛次数 2	15	12	8	20	20	20
平均运行时间 2/s	1968	2019	2352	19	18	22
最优解首次出现 2/代	63	68	72	16	19	23
获优率 2/%	89	78	73	100	100	100

注: 获优率指运算结束后的最优解总数占总运算次数的百分比

## 5 结论

1) 与 GA 算法相比,用 ELM 算法求解高维度组合优化问题时,在全局寻优、逃逸局部极值、收敛效率等方面具有明显优势。因此,ELM 为电压暂降状态估计问题的求解开辟了一条新途径。

2) 未来还需考虑系统故障时开关操作、变压器及电容器组的投切、大容量感应电机起动等因素对形成  $M$  时的影响,以便限定电压暂降误差<sup>[21-24]</sup>。

## 参考文献

[1] 李妍,余欣梅,熊信银,等. 电力系统电压暂降分析计算方法综述[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 74-78.  
LI Yan, YU Xinmei, XIONG Xinyin, et al. A survey on calculation and analysis methods of voltage sag[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 74-78.

[2] 李政光,桂贤明,肖先勇. 敏感负荷电压暂降失效率区间概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 37-42.  
LI Zhengguang, GUI Xianming, XIAO Xianyong. Interval failure probability assessment of sensitive load due to voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 37-42.

[3] 闵伟,周志宇,周振华. 改进型 Sage-Husa 卡尔曼滤波

器在电压暂降检测中的应用[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 230-234.

MIN Wei, ZHOU Zhiyu, ZHOU Zhenhua. Application of improved Sage-Husa Kalman filter in voltage sag detection[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 230-234.

[4] 肖助力,龚仁喜,陈双. 一种改进不完全 S 变换的电压暂降检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 62-68.  
XIAO Zhuli, GONG Renxi, CHEN Shuang. Detection of voltage sag by a modified incomplete S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 62-68.

[5] 付锦,王先洪,欧智乐,等. 改进类电磁机制算法在多目标动态电网规划中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 95-99.  
FU Jin, WANG Xianhong, OU Zhile, et al. Application of improved electromagnetism-like mechanism in multi-objective dynamic power network planning[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 95-99.

[6] ESPINOSA-JUÁREZ E, HERNÁNDEZ A. A method for voltage sag state estimation in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2517-2525.

[7] 王佳兴,杨洪耕,王泽,等. 基于广义逆算法的电压暂降状态估计[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(4): 18-23.  
WANG Jiaying, YANG Honggeng, WANG Ze, et al. Method of voltage sag state estimation based on generalized inverse matrix[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(4): 18-23.

[8] 刘怡君,杨洪耕,王佳兴,等. 基于量子行为粒子群优化算法的电压暂降状态估计[J]. 电测与仪表, 2015, 52(19): 1-6.  
LIU Yijun, YANG Honggeng, WANG Jiaying, et al. Voltage sag state estimation based on quantum-behaved particle swarm optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(19): 1-6.

[9] 孙晓璐,马静,李渊博,等. 基于云模型的电压暂降设备敏感度评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 100-104.  
SUN Xiaolu, MA Jing, LI Yuanbo, et al. Equipment sensitivity evaluation based on cloud model due to voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 100-104.

[10] 黄小庆,曹阳,吴卫良,等. 考虑电压暂降指标的电压协调控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 147-154.  
HUANG Xiaoqing, CAO Yang, WU Weiliang, et al. Research on voltage coordination control method considering voltage sag index[J]. Power System Protection

- and Control, 2015, 43(22): 147-154.
- [11] ESPINOSA-JUAREZ E, HERNÁNDEZ Z A, OLGUIN G. An approach based on analytical expressions for optimal location of voltage sag monitors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2034-2042.
- [12] ALMEIDA C F M, KAGAN N. Using genetic algorithms and fuzzy programming to monitor voltage sags and swells[J]. IEEE Intelligent Systems, 2011, 26(2): 46-53.
- [13] OLGUIN G, VUINOVIČ F, BOLLEN M H J. An optimal monitoring program for obtaining voltage sag system indexes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 378-384.
- [14] 吕伟, 田立军. 基于凹陷域分析的电压暂降监测点优化配置[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 45-50.  
LÜ Wei, TIAN Lijun. Optimal allocation of voltage sag monitoring based on exposed area analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 45-50.
- [15] 赵莹, 赵川, 叶华, 等. 应用主成分分析约简电压暂降扰动源识别特征的方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 105-110.  
ZHAO Ying, ZHAO Chuan, YE Hua, et al. Method to reduce identification feature of different voltage sag disturbance source based on principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 105-110.
- [16] 谭丹, 杨洪耕. 基于故障识别法的电压暂降监测点的优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 7-12.  
TAN Dan, YANG Honggeng. An optimum allocation of voltage sag monitor based on fault recognition method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 7-12.
- [17] HAO Zhenghang, YAO Zhiqing, LI Shaohua, et al. The contribution of double-fed wind farms to transient voltage and damping of power grids[J]. Tehnicki Vjesnik, 2015, 22(1): 43-49.
- [18] ESPINOSA E, HERNÁNDEZ A. An analytical approach for stochastic assessment of balanced and unbalanced voltage sags in large systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1493-1500.
- [19] 刘旭娜, 肖先勇, 徐方维, 等. 敏感设备电压暂降严重程度可信性评价测度与方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 190-196.
- LIU Xuna, XIAO Xianyong, XU Fangwei, et al. Credibility measure and assessment method of sensitive equipment voltage sag severity[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 190-196.
- [20] 马慧, 张开如, 高芳, 等. 电网闪断对距离保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 81-86.  
MA Hui, ZHANG Kairu, GAO Fang, et al. Effect of power grid flash broken on distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 81-86.
- [21] 赵逸众, 曾卫东, 童博, 等. 排放约束下的火电厂节能经济调度模型[J]. 热力发电, 2015, 44(6): 47-51.  
ZHAO Yizhong, ZENG Weidong, TONG Bo, et al. Economical scheduling model for energy saving of a thermal power unit with pollutant emission constraints[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(6): 47-51.
- [22] 刘琳. 光伏电站有功功率优化分配[J]. 热力发电, 2015, 44(11): 104-108.  
LIU Lin. Active power control in photovoltaic power plants[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(11): 104-108.
- [23] 雷颖, 范伟强, 牛帅, 等. 复合型电能质量调节装置的研制[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 150-153.  
LEI Ying, FAN Weiqiang, NIU Shuai, et al. Development of composite power quality regulation device[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 150-153.
- [24] 潘爱强, 时珊珊, 董瑞安, 等. 微网电能质量特征及其监测分析[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 133-138.  
PAN Aiqiang, SHI Shanshan, DONG Ruian, et al. Power quality characteristics and detection concerning in microgrid[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 133-138.

收稿日期: 2016-05-21; 修回日期: 2016-07-05

作者简介:

付 锦(1985-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事调度自动化及计算机信息处理方面的研究工作; Email: fujindequanpin@163.com

丁 蓝(1987-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事调度自动化及计算机信息处理方面的研究工作;

苟长松(1990-), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事调度自动化及计算机信息处理方面的研究工作。

(编辑 魏小丽)