

含分布式发电的配电网安全风险评估的研究

牛沁¹, 李永¹, 陆惠忠¹, 陈红¹, 黄浩², 储贻道¹

(1. 国网安徽省电力有限公司检修分公司, 安徽 合肥 230000; 2. 国网上海市电力公司嘉定供电分公司, 上海 201800)

摘要: 随着分布式发电技术快速发展, 分布式电源在配电系统中的渗透率越来越高, 与此带来的安全影响不可忽视, 需要进行有效的安全评估。提出了基于层次分析法的综合评估算法(CEA-AHP), 该算法通过建立分布式电源接入电网的节点模型, 结合配电网灵活的结构特性, 利用效用理论, 从低电压风险、负荷过载风险和失负荷风险三个方面对该类配电网进行安全风险综合评估。采用IEEE33节点配电系统, 通过对原配电系统、加入DG后配电系统及切除部分联络线后系统进行分析验证, 表明该算法能够准确反映同一假想故障不同重构方案下和不同假想故障下电网安全性的相对高低, 为含分布式的配电网安全风险评估、检修和规划提供可靠参考。

关键词: 分布式发电; 配电网; 效用理论; 安全风险评估

Security risk assessment of distribution network considering distribution generation

NIU Qin¹, LI Yong¹, LU Huizhong¹, CHEN Hong¹, HUANG Hao², CHU Yidao¹

(1. State Grid Anhui Electric Power Maintenance Company, Hefei 230000, China;
2. Jiading Power Supply Company of State Grid Shanghai Municipal Power Company, Shanghai 201800, China)

Abstract: With the rapid development of DG technology, penetration rate of DG from distribution network is increasing, meanwhile the security influence cannot be ignored which need effective security evaluation. The comprehensive evaluation algorithm based on analytic hierarchy process (CEA-AHP) is presented. DG node model to power grid is established, combining flexible structure quality of distribution network, the security risk of this kind of power grid is comprehensively evaluated by using utility theory, through low voltage risk, overload risk and loss of load risk three aspects. Adopting IEEE 33 nodes distribution network system, by analyzing the original system, considering DG system and system of cutting a tie-line, the example has shown this kind of evaluation can reflect relative level of power grid security under different hypothetical accidents and the various reconfiguration method in a certain accident, providing reliable reference for assessment, overhaul and planning about distribution network considering DG.

Key words: DG; distribution network; utility theory; security risk

0 引言

近年来, 分布式电源迅速发展, 学者们对该领域进行了大量研究^[1-5]。文献[6]对含分布式的配电网可能接线模式进行了定量分析, 研究最为有效的接线模式。文献[7]从分布式电源类型、容

量以及运行方式对配电网可靠性的影响进行了分析。文献[8]对于不同类型和排列方式的分布式电源, 从电能质量角度考虑了对配电网的影响。文献[9]针对负荷的时变特性和分布式电源的出力波动性, 分析了分布式电源对电网电压无功控制效

果的影响。文献[10]讨论了分布式电源接入电网的负荷分布模型及接入位置对配电系统电压水平的影响。纵然有多方面的研究,然而缺乏有关安全影响的考量与分析。

安全评估,又称风险评估。通过辨识系统中可能存在的风险,分析其造成的严重程度,评估系统安全状态。本文从安全风险角度,建立分布式电源接入电网模型,基于风险理论和效用理论,通过先分析单个线路的假想故障,定量评估其后果严重程度,进而综合分析,评估含分布式电源的配电网的安全风险。

1 相关理论

1.1 风险理论

风险理论是关于导致事故灾害的可能性大小及其严重程度的理论^[11]。通常情况下,风险可以定量表示为

$$R(C/X_i) = \sum_i P(E/X_i) S(C/E) \quad (1)$$

式中, i 为事故个数; X_i 为未发生事故; E 为发生故障; C 为风险事故产生的后果; $P(E/X_i)$ 为正常情况下发生事故的概率大小; $S(C/E)$ 为事故发生时产生某种后果的严重程度; $R(C/X_i)$ 为系统综合风险值。

1.2 效用理论

效用是指一种主观感受,是指物品或服务等给人提供的满意程度。效用函数是对效用的一种数量表示,已广泛应用于风险决策中,用来衡量对待风险的态度^[12]。本文采用效用函数来量化损失带来的不满意程度,即事故产生给电网带来的严重程度。设 x 为损失, $S(x)$ 为损失带来的不满意程度。随着损失的增加,不满意程度增加,而不满意程度增加的速度也会随之增加,即 $S'(x) > 0$, $S''(x) > 0$ 。在电网故障时, $S'(x) > 0$ 表示随着损失的增加,电网故障严重程度增加; $S''(x) > 0$ 表示严重程度增加的速度加快^[12]。根据前述效用函数性质,可采用指数函数表示效用函数^[12],即

$$S(x) = a(e^{b(x+c)} - d) \quad (2)$$

本文利用效用理论来讨论事故后果的严重程度。

2 分布式电源的典型节点接入模型

不同种类的分布式电源由于接入配电网方式有差别,需按不同模型处理^[13]。

2.1 风力发电机数学模型

风能具有较大的随机性以及影响风机发电的空气密度、湿度等复杂因素,所以本文主要考虑理想情况下风机的输出功率 P_m ,其数学模型为

$$P_m = 0.5 \rho A V^3 C_p \quad (3)$$

式中, ρ 为空气密度, kg/m^3 ; V 为风速, m/s ; A 为扫掠面积, m^2 ; C_p 为风能利用系数。

2.2 光伏发电数学模型

光伏发电设备的输出功率主要是与光照强度、温度和光照时长等因素有关,其特点是输出电能质量相对较高、电压稳定。光伏发电的一般数学模型如式(4)、式(5)所示。

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_{AC}}{G_{STC}} [1 + k(T_c - T_r)] \quad (4)$$

$$T_c = T_{amd} + 30 \times \frac{G_{AC}}{1000} \quad (5)$$

2.3 燃料电池数学模型

燃料电池不仅效率高,而且运行时不会排放氧化硫颗粒物、一氧化碳等污染物,环保性更好,且整体转换效率可高达65%。在配电网系统中的紧急备用电源、削峰填谷等方面发挥着重大作用,燃料电池的数学模型如下。

$$U_{FC} = N_{cell} N_s U'_{FC} \quad (6)$$

$$I_{FC} = N_s I'_{FC} \quad (7)$$

$$P_{FC} = U_{FC} I_{FC} \quad (8)$$

2.4 燃气轮机

燃气轮机主要以天然气、甲烷等作为燃料。排出废气可用于供热,其电能转换效率超过75%。数学模型如下,即

$$P_{out} = 0.000\ 293 Q_i (HV)_s \eta_t \left(\frac{PS}{PS_s} \right) \left(\frac{T_s}{T} \right) \quad (9)$$

对于上述四种模型：已知输出功率的分布式电源，可作为负的负荷，按PQ节点处理。如处理准确度要求不高的风力发电机，可在风速已知前提下，由功率曲线，根据式（9）计算出各台风力发电机的机械功率。

通过电压控制逆变器接入电网的分布式电源和同步发电机，如内燃机，可按PV节点处理。

采用电流逆变器接入电网的分布式电源，如光伏发电系统、部分风力发电机和微型燃气轮机等，可以按输出限定的逆变器进行建模，仿真出有功输出和注入电流恒定的PI节点，相应的无功功率可以由式（10）迭代得到。

$$Q_{k+1} = \sqrt{|I|^2 (e_k^2 + f_k^2) - P^2} \quad (10)$$

式中， Q_{k+1} 为第 $k+1$ 次迭代的分布式电源的无功功率值； e_k 、 f_k 分别为第 k 次迭代得到的电压的实部和虚部； I 为恒定的分布式电源的电流向量的幅值； P 为恒定的有功功率值。

本文采用此模型进行实例验证。

3 基于层次分析法的综合评估算法

3.1 分布式电源接入

选取光伏发电系统为例，通过电流逆变器接入配电网，即以PI节点模型接入电网，在对实例进行潮流计算时，需先根据当前电压值计算出接入DG节点相应的无功功率，再转化为PQ节点。

3.2 风险指标的构成

风险指标能够将评估对象的风险状况进行量化表示，由事故发生的概率和其造成的严重程度乘积构成。电网发生事故，可能会引起多种风险，包括低电压风险、负荷过载风险以及失负荷风险。通过对单段线路故障的分析，进而评估含有DG的配电网整体安全风险。

（1）低电压风险

低电压风险指标是针对每条母线来定义的，反映的是电网故障造成母线电压偏移的可能性及其危害严重程度。假设事故发生后，设母线 i 的电压为 V_i ， V_0 为电压越限临界值，则母线电压 i 的低

电压损失值表述为^[18]

$$LV_i = \begin{cases} V_0 - V_i & 0 \leq V_i \leq V_0 \\ 0 & V_0 < V_i \end{cases} \quad (11)$$

根据式（2）和式（11），母线 i 的低电压风险严重度函数表示为

$$S_{LV}(LV_i) = e^{LV_i} - 1 \quad (12)$$

因此，可得到系统单个故障低电压严重度为

$$S_{LV} = \sum_{i=1}^j e^{LV_i} - 1 \quad (13)$$

式中， j 为母线总个数。

根据式（13），仿真了低电压风险严重度随母线电压的变化趋势，如图1所示。从图1中可以看出，低电压风险值随母线电压降低而增高。这为实例验证提供了理论依据。

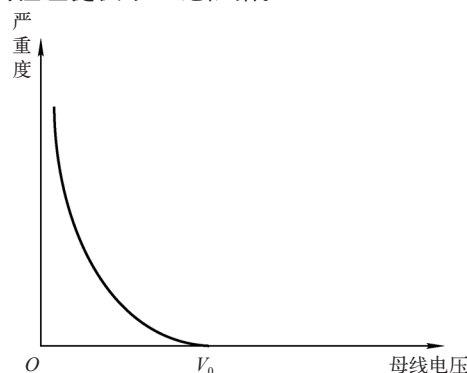


图1 低电压风险严重度曲线

Fig.1 Risk severity curve of low voltage

（2）负荷过载风险

负荷过载指标是针对每条线路定义的，每条线路中流过的潮流超过输送容量限制的百分比决定了其过载严重程度。由于配电网结构一般呈辐射型分布，越到末端，电流越小，过载可能性越小；末端电流的大小变化也可反映在首端电流上。因此在考虑此项指标时，可以模仿低电压指标只考虑母线电压为例，仅考虑各馈线首端负荷过载情况。此时可大大减少统计量，方便实际操作。设支路（包括线路和变压器） i 在事故发生后的电流为 L_i ， L_0 为负荷过载临界值，取值为安全电流的67%。过载损失值为

$$OL = \begin{cases} L_i - L_0 & L_i > L_0 \\ 0 & 0 \leq L_i \leq L_0 \end{cases} \quad (14)$$

根据式(2)和式(14), 线路*i*的负荷过载风险严重度函数表示为

$$S_{OL}(OL_i) = e^{OL_i} - 1 \quad (15)$$

因此, 系统单个故障负荷过载严重度定义为

$$S_{OL} = \sum_{i=1}^j e^{OL_i} - 1 \quad (16)$$

式中, *j*为馈线条数。

根据式(16), 仿真了负荷过载风险严重度曲线, 如图2所示。从图2中可以看出, 负荷过载风险随过负荷值增大而增大。

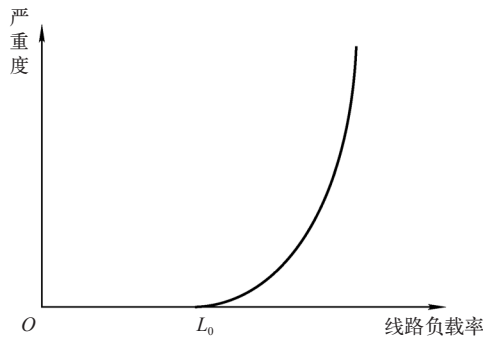


图2 负荷过载风险严重度曲线

Fig.2 Risk severity curve of load overload

(3) 失负荷风险

在配电网中, 失负荷包括两部分: 一部分由隔离故障导致, 无法避免; 另一部分由配电网的辐射型电网结构造成。被隔离的故障下端由于失去供电导致断电, 可通过负荷转移尽量减少切负荷量。从安全角度考虑, 转移负荷有两个约束因素: 网络结构和电网络承载负荷量。因此, 对于最小切负荷, 可用数学式表达, 即

$$\min \sum_{i=1}^N S_{FL}^i \quad (17)$$

约束条件为

$$\begin{aligned} I_i' &\leq I_i^{\max} \\ V_k^{\min} &\leq V_k' \leq V_k^{\max} \\ g &\in G \\ x_j &= 1 \quad j \in D \\ P_{Gi} &= P_{Gi}^{\max} \end{aligned} \quad (18)$$

式中, I_i' 、 $I_i^{\max}$ 为转移负荷后各支路电流和最大允许通过电流; V_k' 、 $V_k^{\min}$ 和 $V_k^{\max}$ 为负荷转移后各节点

电压及电压上下限; *g*为网络拓扑结构; *G*为辐射状网络拓扑结构; x_j 为第*j*个DG与配电网相连的状态; 1表示开关闭合; *D*为DG集合; $P_{Gi}^{\max}$ 为分布式电源最大功率。

失负荷风险指标表示为

$$S_{LD} = \frac{\sum_{i=1}^N S_{FL}^i}{\sum_{j=1}^M S_{SL}^j} \quad (19)$$

式中, S_{FL}^i 为*i*处负荷失负荷量; *N*为失负荷节点数; S_{SL}^j 为*j*处负荷量; *M*为系统总节点数; $\sum_{j=1}^M S_{SL}^j$ 为系统总负荷量。

3.3 系统风险值计算

本文对单项风险指标进行了计算。设向量 $R=(R_1, R_2, \dots, R_n)^T$ 为单项风险指标向量, *n*为假想事故个数, R_i 为单个事故对应该项风险指标值, 则系统单项风险指标定义为

$$R_s = \alpha \frac{1}{n} \|R\|_1 + \beta \|R\|_\infty \quad (20)$$

式中, α 、 β 为权系数, 满足 $\alpha + \beta = 1$; $\|R\|_1$ 、 $\|R\|_\infty$ 为向量*R*的第一范数和无穷范数, 分别反映事故集的累加效果和单个严重事故的突出效果, 减弱简单累加可能存在的风险遮蔽现象; 本文中 α 取0.7, β 取0.3。

本文从低电压风险、负荷过载风险和失负荷风险三个方面对电网进行评估, 基于层次分析法对电网进行综合评估。采用3标度层次分析法比较各指标的相互影响大小, 构建判断矩阵, 计算相应的最大特征值和特征向量, 通过一致性检验后经归一化处理, 得出三大指标权重依次为: $W=(0.30, 0.15, 0.55)$, 综合风险值*C*可表示为

$$C = WR = \sum_{i=1}^3 w_i R_i \quad (21)$$

4 实例验证

本文基于牛顿拉夫逊法对含有分布式电源的配电网进行潮流计算, 采用IEEE-33节点配电系统进行验证。图3为系统图, 表1为支路参数。已知参

数：三相功率的基准值 $S_B=100 \text{ MV}\cdot\text{A}$ ，线电压基准值 $U_B=12.66 \text{ kV}$ ，计算准确度 $\varepsilon=10^{-6}$ 。

对于分布式电源接入，从减小电压波动角度考

虑，分布式电源接在线路中间偏末的位置更适宜，故将其接入节点31处，输出有功 $P=150 \text{ kW}$ ，电流 $I=15 \text{ A}$ 。

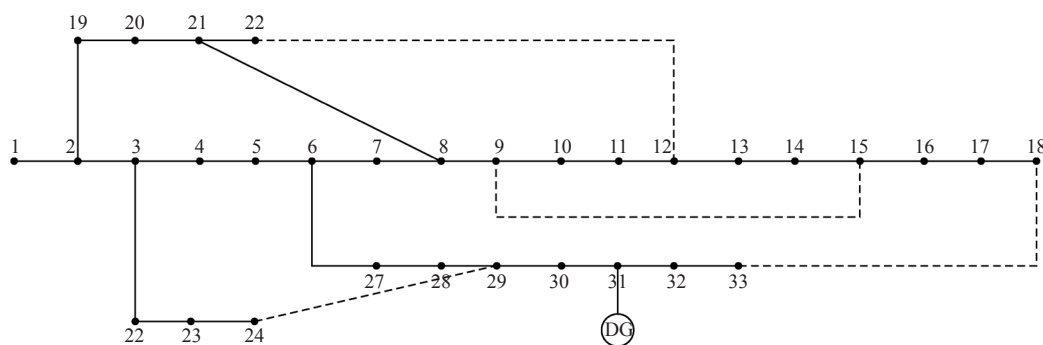


图3 IEEE 33节点配电系统

Fig.3 IEEE 33 nodes distribution system

表1 支路属性

Table1 Properties of branches

支路类型	故障率可能性 (%)	额定电流 (pu)
架空线	0.2	0.072 8

如图3所示，系统图中有32条线路，5条联络线，进行假想故障分析时，若每条支路都处理，则所需处理数据较多，在实际庞大复杂的配电网中可操作性并不大。中间馈线与四条联络线相连，负荷转供方案多，最能够体现配电网灵活多变的网络结构特征，故选取中间馈线1-18段进行典型故障分析。对于部分相邻支路，出现故障时可以转负荷的方案是相同的，如支路12-13、13-14和14-15，故障时可通过联络线9-15、33-18两种方案进行转供。因此对于相同转供方案的支路，仅选取一条验证，详见故障分析结果如表2~表4所示。

当系统负荷因故障转供时，在遵守约束函数的前提下，不同的转供方案对应的最小切负荷值不同，相应的安全风险值就不同，为体现不同转供方案对系统安全风险的不同影响，算例中给出两种联络方式（ $K>1$ ， K 指转供方案个数），分别对应不同的最小失负荷值。 K 值越大，越能体现配电网灵活性，但每种方案未必都有实际意义，因此，当 K 值大于3时按3处理。

接着本文分别分析了假想故障下原系统、接有DG的系统以及接入DG后去掉一根联络线系统三种情况下的安全风险状况。

由表2可得，本文中采用不同转供方案对应系统综合风险值差别并不大，但对单项指标影响较大。例如故障3-4、6-7，右侧方案的切负荷数高于左侧方案，负荷过载指标右方案小于左侧。

接入光伏电源的系统，网络结构并未改变，故障时转供方案不变。比较表2、表3可以发现，系统风险值略有差别，但差别不大。纵观低电压风险指标项，表3中值略有下降，如支路6-7、9-10和15-16，这是由于DG的接入使得节点电压被抬高，电压偏差减少，风险指标值略小。

比较表3、表4，系统综合风险值略高，这是由于去掉联络线22-12，部分支路故障后负荷转移受限制，转移方案 K 值减小，需转供负荷可能由某条线路单独承担，增大安全风险。如图3所示，线路8-12段各支路出现故障原本可以由联络线22-12和33-18及9-15共同分担，但联络线22-12切除后，仅能由联络线33-18转移， K 值降至1，相比切除联络线前，负荷损失增加，故安全风险增大。

5 结束语

提出了基于层次分析法的综合评估算法，算

表2 原系统出现假想故障的分析结果

Table2 Analysis results of original system with hypothetical fault

故障支路	K	低电压风险	负荷过载风险	失负荷风险
3-4	3	0.195 8, 0.146 9	2.226 7, 1.127 4	0.010 8, 0.433 4
6-7	3	0.199, 0.099 1	0.905 7, 0	0.053 8, 0.218
8-9	3	0.118 2, 0.077 4	0.335 7, 0	0.016 2, 0.218
9-10	3	0.233 3, 0.086 1	0.605 9, 0	0.016 2, 0.099 6
12-13	2	0.143 9, 0.061	0, 0.202 5	0.016 2, 0.061 9
15-16	1	0.035 6	0.106 6	0.016 2
单项指标		0.844, 0.398 3	4.414 2, 2.176 7	0.472 9, 1.130 6
综合风险			1.175 4/1.076 8	

表3 含光伏电源出现假想故障的分析结果

Table3 Analysis result of distribution network considering DG with hypothetical fault

故障支路	K	低电压风险	负荷过载风险	失负荷风险
3-4	3	0.151 7, 0.156 7	1.962 6, 0.520 1	0.010 8, 0.484 5
6-7	3	0.138, 0.088 2	1.2980, 0	0.053 8, 0.236 9
8-9	3	0.192 3, 0.079 3	0, 0	0.016 2, 0.367
9-10	3	0.015 4, 0.087	0, 0.444 7	0.016 2, 0.160 2
12-13	3	0.031 4, 0.070 5	0, 0.800 3	0.016 2, 0.016 2
15-16	1	0.015	0.242 3	0.016 2
单项指标		0.585, 0.541 5	4.925, 3.878 2	0.368 7, 1.304
系统综合风险			1.1170/1.461 4	

表4 去掉联络线22-12后含光伏电源系统的分析结果

Table4 Analysis result of distribution network considering DG with cutting tie-line 22-12

故障支路	K	低电压	负荷过载风险	失负荷风险
3-4	3	0.272 6, 0.156 7	1.955 7, 0.520 1	0.010 8, 0.504 9
6-7	3	0.035 8, 0.088 2	1.307 3, 0	0.070 0, 0.246 8
8-9	1	0.079 3	0	0.375 9
9-10	3	0.015 4, 0.087	0, 0.444 7	0.016 2, 0.166 9
12-13	3	0.031 4, 0.070 5	0, 0.800 3	0.016 2, 0.016 2
15-16	1	0.015	0.242 3	0.016 2
单项指标		0.539 4/0.537 7	5.982 7/4.934 2	0.743 6/1.353 2
系统综合风险			1.468 2/1.645 7	

法从安全风险角度出发,依据效用理论,建立分布式电源接入模型及安全风险评估指标体系,对含有光伏发电的配电网进行综合安全风险评估。算例表明该算法能够定量评估不同故障下后果严重程度大小,及不同转供方案下安全风险的相对高低,为电网规划和检修提供可靠参考。

参考文献

- [1] WANG Li, V Quang Son, PROKHOROV V A. Dynamic stability analysis of a hybrid wave and photovoltaic power generation system integrated into a distribution power grid[J]. IEEE Transactions on

Sustainable Energy, 2017, 8(1): 404-413.

- [2] 徐萌, 邹贵彬, 高磊, 等. 含逆变型分布式电源的配电网正序阻抗纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2017, (12): 93-99.

XU Meng, ZOU Guibin, GAO Lei, et al. Pilot protection of positive sequence component impedance for distribution network with inverter interfaced distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, (12): 93-99.

- [3] 周念成, 孟潇潇, 王强钢. 考虑逆变型分布式电源时滞的孤岛微网小信号稳定分析[J]. 电力系统自动化, 2017(12): 20-25.

- ZHOU Niancheng, MENG Xiaoxiao, WANG Qianggang. Small signal stability analysis of islanded microgrid considering time-delay effect of inverter interfaced distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017(12): 20-25.
- [4] 王博, 肖峻, 周济. 主动配电网中分布式电源和微网的运行域[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 363-370.
- WANG Bo, XIAO Jun, ZHOU Ji, et al. Dispatchable region of distributed generators and microgrids in distribution systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 363-370.
- [5] NIKMEHR Nima, NAIAFI RAVADANEGH Sajad. Optimal power dispatch of multi-microgrids at future smart distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1648-1657.
- [6] 缪源诚, 程浩忠, 龚小雪, 等. 含微网的配电网接线模式探讨[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 17-23.
- MIAO Yuancheng, CHENG Haozhong, GONG Xiaoxue, et al. Evaluation of a distribution network connection mode considering micro-grid[J]. Proceeding of the CSEE, 2012, 32(1): 17-23.
- [7] 李志奇, 吕林, 张燃. 含微网的新型配电网可靠性分析[J]. 华东电力, 2012, 40(5): 803-807.
- LI Zhiqi, LV Lin, ZHANG Ran. Reliability of distribution network with microgrid[J]. East China Electric Power, 2012, 40(5): 803-807.
- [8] 阎鼎, 龙禹, 程浩忠, 等. 规划阶段含微网的配电网电能质量评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(6): 9-15.
- YAN Ding, LONG Yu, CHENG Haozhong, et al. Power quality assessment for distribution network incorporating micro-grid in planning stage[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(6): 9-15.
- [9] 王旭强, 刘广一, 曾沅, 等. 分布式电源接入下配电网电压无功控制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 47-53.
- WANG Xuqiang, LIU Guangyi, ZENG Yuan, et al. Analysis on the effects of volt/var control method considering distribution generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 47-53.
- [10] 陈芳, 王玮, 徐丽杰, 等. 分布式电源接入对配电网电压变化的分析[J]. 电力系统自动化学报, 2012, 24(4): 145-149.
- CHENG Fang, WANG Wei, XU Lijie, et al. Analyzing the voltage variation of distribution network including distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(4): 145-149.
- [11] 彭俊好, 徐国爱, 杨义先, 等. 基于效用的安全风险度量模型[J]. 北京邮电大学学报, 2006, 29(2): 59-61.
- PENG Junhao, XU Guoai, YANG Yixian, et al. Measure model of security risk based on utility[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2006, 29(2): 59-61, 69.
- [12] 张国华, 段满银, 张建华, 等. 基于证据理论和效用理论的电力系统风险评估[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 1-4.
- ZHANG Guohua, DUAN Manyin, ZHANG Jianhua, et al. Power system risk assessment based on the evidence theory and utility theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 1-4, 47.
- [13] 徐青山. 分布式发电与微电网技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.

作者简介



牛沁

牛沁(1989-),女,硕士研究生,主要研究方向为电网安全评估。

(收稿日期:2018-08-14) **EA**