

基于互近似熵的微电网并网同步检测方法

沈冰¹, 肖远兴², 翁利国³

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200437; 2. 上海欣能信息科技发展有限公司, 上海 200025;
3. 国网浙江杭州市萧山区供电公司, 浙江 杭州 311200)

摘要: 针对经典的微电网并网同步检测方法需同时比较两侧电压相位、幅值和频率的繁琐过程, 提出基于互近似熵的微电网并网同步检测方法。该方法只需利用单一的互近似熵值就能比较并网开关两侧电压的相似度。分析基于互近似熵的微电网并网同步检测方法的原理和优势, 研究微电网并网同步检测方法中互近似熵参数取值等关键问题, 进而具体介绍基于互近似熵的微电网并网同步检测方法的实现步骤。最后在 Matlab 中搭建微电网通过断路器并入配电网的简化模型, 仿真微电网开关两侧电压相位、幅值和频率变化时的互近似熵值。仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词: 微电网; 并网; 同步检测; 电压; 互近似熵

Synchronization closing detection method of microgrid based on mutual approximate entropy

SHEN Bing¹, XIAO Yuanxing², WENG Ligu³

(1. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China; 2. Shanghai Shineenergy Information Technology Development Co., Ltd., Shanghai 200025, China; 3. State Grid Xiaoshan Power Supply Company, Hangzhou 311200, China)

Abstract: Classic synchronization closing detection method of microgrid needs the tedious process to simultaneously compare the voltage phase, amplitude and frequency on both sides. Synchronization closing detection method of microgrid based on mutual approximate entropy is proposed, which only needs the single value of mutual approximate entropy to compare the voltage similarity on both sides. The principle and advantage of synchronization detection closing method of microgrid based on mutual approximate entropy are analyzed. And the key issue such as the value setting of the method is studied. Then the implementation steps of the method is introduced in detail. Finally the simplified model of microgrid connecting to distribution network is constructed in Matlab, where the value of mutual approximate entropy is simulated on the change of voltage phase, amplitude and frequency. The simulation result verifies the effectiveness of the method.

Key words: microgrid; closing; synchronization detection; voltage; mutual approximate entropy

0 引言

作为传统大电网的有益补充, 微电网由分布式电源、储能装置、能量转换装置、相关负荷和监控、保护装置等元件组成, 有力地解决了当前电力工业热门的分布式能源问题, 是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统^[1-3]。

微电网是涵盖了多种形式、灵活分布电源的复杂网络, 相对于传统的主电网而言, 存在着并网运行、脱离外部电网解列孤岛运行、重并网等多种运行状态。

由于微电网既可以与主电网并网运行, 也可以孤立运行, 这就要求微电网能以灵活方式接入主电网中。微电网能够以稳定、无缝切换的方式并入主电网, 既可以避免对主电网的冲击, 也是实现微电网系统中的敏感负荷能不间断供电这一重要目标的保障。

微电网中的分布式电源通常涉及电力电子器件进行能源变换, 或者电源本身就具有一定的随机性等特点, 微电网并网过程也更加复杂。为了应对大量分布式并网对主电网的冲击, 通常采用先进的并网逆变器, 以较好处理微电网并网过程的同步、

电能质量、功率控制、电压与频率响应、电网支撑等诸多技术要求。而作为微电网并网的基础条件，并网的同步性对于微电网平稳、灵活地接入主电网具有重要意义。

微电网在孤岛运行时，其电压与电网侧电压通常存在相位、幅值和频率方面并不一定完全一致的情况。在微电网开关两侧电压存在较大差异时，如果采用微电网直接合闸并入主电网的话，那么可能出现较大的冲击电流，不仅可能导致并网失败，情况严重时甚至还损害微电网开关两侧的设备^[4-5]。

因此，微电网在并入主电网前，两个独立运行的电网系统需要进行同步判断，两侧电压在相位、幅值和频率最大可能的接近，实现可靠、安全的并网，达到微电网平滑、无缝地接入主电网^[6-8]。

由于电力电子元器件在并网过程中所具有的快速调节功能，使得微电网的电压相位、幅值和频率的变化相对于传统电网的变化更快，所允许的微电网并网的时间间隔更短，这就要求微电网同步并网识别算法尽可能高效。

微电网接入主电网过程中，同步并网需检测电网和微电网两侧电压相位、幅值和频率的差异性，其实质就是识别电网和微电网两侧电压波形的相似性，互近似熵由于可以量化波形的相似性，有望为微电网并网提供一种新的同步合闸识别方法^[9]。

1 互近似熵

互近似熵(Cross Approximate Entropy, CApEn)是近年发展起来的一种用于度量两个离散化序列的复杂性和统计量化的分析方法，可以用来表征两个离散化序列或两条曲线间的相似性，或者说两个不同的序列中寻找相似的模式。互近似熵的运算过程，实际上是在确定两个序列在时间轴上其模式的相似程度有多大，或者说两个系列模式上的不规则性有多大^[10]。

对于随机信号或是确定性信号都可以使用，也可以应用于由随机成分和确定性成分混合的信号。若一个非线性的物理过程复杂程度越高，那么互近似熵值将越大。

互近似熵是从衡量时间序列复杂性的角度来度量信号中产生新模式的概率大小，产生新模式的概率越大，序列的复杂性越大，相应的近似熵也越大。可用互近似熵来研究微电网合闸信号的不规则性和复杂性，通过比较一定条件下振动信号在不同噪声干扰下的近似熵的相对变化，可以直接反映该振动信号在此期间的运行状况^[11-12]。

互近似熵是一种非线性时间序列复杂度的定量描述，它对于相对较短的(所需数据可以只需大于

100 个数据点)、含噪声的时间序列显示出潜在的应用价值，这是因为产生近似熵是用一种有效的统计方式——边缘概率的分布来区分各种过程。与传统的电网并网同步方法比较，基于互近似熵的微电网同步识别方法具有以下突出优点：

1) 数据窗灵活性好，而且数据窗较小就能获得稳定的熵值^[13-14]。由于互近似熵方法是从统计的角度区别不同时间过程的复杂性，因此只用较短的数据就可以计算得到所需的互近似熵值。

具体而言，对于各自具有自身固定变化趋势的两个序列，当采样点数在合理区间变动(哪怕这个区间所包含的数据差别比较大)时，互近似熵的标准差也很小，即对于平稳过程的两条序列曲线，数据窗的点数不会显著地影响互近似熵值计算的稳健性。互近似熵值只需比较短的数据窗就能计算到稳定熵值的特性，对于微电网的同步合闸具有很强的工程实际应用价值，一方面可以减少同步合闸所需的电气量采样数据量；另一方面，数据量少能加快合闸同步角的计算速度，减少合闸操作的计算延时误差。

2) 算法本身具有一定的抗干扰能力。传统电网所处的高频、强电环境对保护、控制等二次设备和系统带来的噪声干扰是电力信息系统亟需解决的难题^[15]。而在微电网的实际运行中，由于众多电力电子元件的使用，在传统电网电磁噪声的基础上，增加了更复杂的电磁干扰。互近似熵方法自身对瞬态强干扰具有一定的抗干扰能力，这有助于减少所采集的数据受到噪声干扰而导致同步合闸命令不准确。

2 微电网同步并网的互近似熵原理

为了减少开关合闸时两侧电压不同步带来的电磁冲击，孤岛微电网进行并网合闸前，需根据当前的状态进行同步判断，如图 1 所示。首先分别采集电网和微电网两侧的电压信息，进而根据所采集的电压，分别计算开关两侧的电压幅值、频率和相位差，并根据偏差信号调整微电网的电压幅值和频率；由于频率差将导致相位周期变化，在对开关两侧电压不断采集和计算过程中，根据两侧的偏差进行同步条件判断。

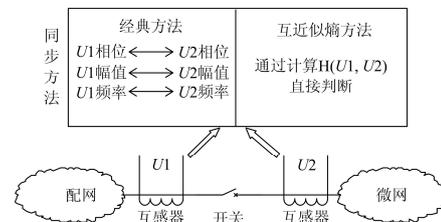


图 1 微电网同步方法

Fig. 1 Synchronization closing detection method of microgrid

在整个并网合闸的预同步过程中, 需要不断地比较开关两侧电压的幅值、频率和相位这 3 个判断条件, 电力现场做法是从电压采样值中分别获得当前时刻的幅值、频率和相位, 通常采用全波傅里叶等经典算法计算幅值; 频率和相位往往还增加波形整理环节, 将电压的正弦波形通过比较器整理成矩形波, 再通过计数器和比较器获得频率和相位。由于现场数据容易受到噪声干扰, 不容易通过波形的过零点准确获得相位, 一般还需要借助锁相环等技术。

经典的微电网并网同步方法, 需要从开关两端的电压采集数据中, 分别提取幅值、频率和相位 3 个数值, 涉及到波形整理环节、锁相环等多项技术和庞大的计算量, 尤其在微电网侧电压不断调整的预同步过程中, 需在有效的时间内实时计算幅值、频率和相位等多个数值, 实现难度较大。

注意到微电网并网的同步过程, 实质就是寻找开关两侧电压尽可能相同的过程, 也就是探寻开关两侧电压波形的相识度。因此, 一种新颖的并网同步思路是对开关两侧的整个波形直接进行相似度比较, 从而避开先对波形进行分解, 再提取出所需的电压幅值、频率和相位进行比较的传统做法, 如图 1 所示。

由于互近似熵方法专长于两个离散序列在时间轴上模式的相似程度, 刚好适用于微电网并网的同步过程中对开关两侧电压波形相似度的识别。互近似熵方法可以反映电压信号的非线性特征, 对研究微电网开关两侧的电压特征及动态信息有重要的意义。

互近似熵应用于开关两侧的电压波形识别时, 表征在时间轴上, 两个由离散数据序列构成的电压的相似性的程度, 即电网侧电压数据序列与微电网侧电压数据序列互相近似的概率。定义开关两侧电压的互近似熵值为

$$CApEn(m, r) = -\frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-n} \ln P_i(B|A) \quad (1)$$

式中: B 和 A 分别为两侧电压采样值在容限 r 意义下的相近性, 记为事件 A 和 B , 而 $P_i(B|A)$ 表示在容限 r 意义下的相似的概率; N 是开关两端电压参与互近似熵运算的数据个数, 互近似熵方法只需要比较短的数据就能估计出比较稳定的统计值, 所需的数据点大致在 100~5000 点, 一般在 1000 点左右。以当前电力自动化系统最全面的 IEC61850-9-2LE 为例, 电气量采样速率为每周波 80 或 256 个点, 若采样率为每周波 256 个点, 则采用互近似熵方法实现微电网同步并网只需 4 个周波左右的时间^[16]。

在互近似熵的计算中, 相似容限 r 的确定是关键环节, r 实质上是相似比较的阈值。如果相似容限 r 取得太小, 则满足相似条件的模式可能很少, 导致对条件概率的估计效果很差; 反之, 如果相似容限 r 取得过于大, 则满足相似条件的模式过多, 时间序列的细节信息就会损失很多。为了避免电压采集过程中产生的噪声导致互近似熵值不准确, r 取值应该大于主要噪声的幅度。实际应用中 r 常选协方差的 0.2 倍。

模式维数 m 取值越大, 就需要越多的数据点 N 或更大的相似容限 r 以获得对条件概率 $P_i(B|A)$ 的合理估计, 而实际应用中 N 不可能太大, r 太大会导致细节的丢失。因此工程实际应用中, 模式维数 m 一般取 2。

由以上分析可知, 微电网开关两侧电压波形采用互近似熵方法, 相当于两个波形相似性的对数条件概率的均值, 即表征开关两侧电压的时间序列在模式上的互相似程度, 相似程度越小, 互近似熵的值就越大。在微电网并网的预同步过程, 根据上述方法不断计算两端电压的互近似熵值, 进而通过调节微电网侧的电压, 逐步使得该互近似熵值尽可能小, 从而使得两端电压最接近, 实现同步并网, 减少微电网并网由于电压不一致带来的冲击。

3 具体实现

在微电网开关并网过程中, 开关两侧的电气信息不断变化, 因此, 需要同步采集开关两侧的电压。智能电子设备以 IEC61850-9-2LE 建议的每周波 256 个点的采样频率, 对开关两侧的电压进行同步地离散化和数字化处理, 从而形成开关两侧对应的同步电压。并网开关两侧电压的互近似熵计算过程中, 需要计算嵌入维度为 m 时两侧电压的差值, 进而找到所有小于相似容限 r 的个数, 具体流程包括:

1) 根据所采集的微电网开关两侧的电压, 按时间序列截取参与互近似熵值运算的数组, 从而按序形成 m 维矢量, 取两侧电压矢量:

$$U(i) = [u(i), \dots, (i+m-1)], i = 1, \dots, N-m+1 \quad (2)$$

$$U(j) = [u(j), \dots, (j+m-1)], j = 1, \dots, N-m+1 \quad (3)$$

式中, N 为算法的数据窗, 本文的数据窗选定为 4 个周波, 共 1024 个采样点参与运算。

2) 由微电网开关两侧的电压数组, 计算互近似熵最重要的参数之一相似容限 r , 本文选定 r 为两侧电压数组 U_i 与 U_j 协方差的 0.2 倍, 即

$$r = 0.2 \times \text{COV}(U_i, U_j) \quad (4)$$

3) 对于每一个 i 和 j 值, 计算两侧电压数组 U_i 与

U_j 对应的差值, 记为 D :

$$D(U(i), U(j)) = \max_{1 \leq p \leq m} (|U_i(k+p-1) - U_j(k+p-1)|) \quad (5)$$

4) 根据步骤 2) 所得到的相似容限 r 作为比较基准, 对每一个 i 和 j 值, 统计 $D(U(i), U(j))$ 小于 r 的个数 $N_{m,r}$, 并计算 $N_{m,r}$ 与总的矢量个数 $(N-m+1)$ 的比值, 该值表征开关两侧电压数组中 m 维模式在相似容限 r 条件下接近的概率, 记为 $C_{m,r}$, 表达式为

$$C_{m,r} = (D(U(i), U(j)) < r \text{ 的个数}) / (N-m+1) \quad (6)$$

5) 计算开关两侧电压 U_i 和 U_j 的互相关程度, 首先对步骤 4) 获得的 $C_{m,r}$ 求对数, 进而求其平均值, 表达式为

$$T_{m,r}(D(U(i), U(j))) = \frac{1}{N-m+1} \sum_{k=1}^{N-m+1} \ln C_{m,r}(D(U(i), U(j))) \quad (7)$$

6) 当嵌入维度变为 $(m+1)$ 时, 重复上述步骤 1) — 5) 的过程, 得到 $(m+1)$ 维数时的互相关程度数值

$$T_{m+1,r}(D(U(i), U(j)))。$$

7) 将步骤 5) 和 6) 分别得到 $T_{m,r}(D(U(i), U(j)))$ 和 $T_{m+1,r}(D(U(i), U(j)))$ 做差值, 得到具有时间意义的互近似熵值 $CApEn(m, r)$, 具体表达式为

$$CApEn(m, r) = T_{m,r}(D(U(i), U(j))) - T_{m+1,r}(D(U(i), U(j))) \quad (8)$$

4 算例

在 Matlab 中搭建微电网通过断路器并入配电网的简化模型, 如图 2 所示。配电网侧采用最简单的三相电源, 以方便在配电网中产生幅值、频率和相位可变的电源; 微电网侧采用光伏经三相桥式逆变模型, 基于 PWM 实现微电网侧可变的电压源; 配电网和微电网的两侧电压接入到三相变压器模型中。以相同的采用频率同步测量三相变压器开关两侧的电压, 采样频率采用 IEC61850-9-2LE 协议规定的其中一种每周波 256 个采样点。

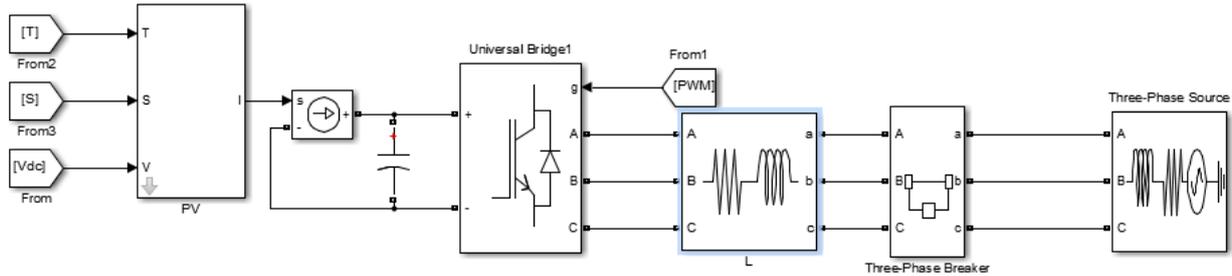


图 2 微电网并入配电网的简化仿真模型

Fig. 2 Simplified model of microgrid connecting to distribution network

为了全面测试微电网同步并网的互近似熵性能, 分别测试电压属性中幅值、频率和相位变化的情况。因为只是比较两端电压不一致时的互近似熵, 为了便于仿真, 采用微电网端为基准电源输出, 通过简单设置配电网所采用的三相电源, 便可方便制造所需的开关两端电压不同步的情况。

本文将重点考察微电网开关两侧电压幅值、频率和相位变化时, 所对应的互近似熵值能否客观地反映两侧电压的一致性情况。

由于实际电网会受到各类噪声影响, 本文也在配电网侧的电压增加一定比例的白噪声, 以增加仿真的现场真实性, 从而更好验证噪声对互近似熵算法的影响。

互近似熵算法的具体数据处理上, 本文算法采用 4 个周波(共 1024 个采样点)的数据窗进行互近似

熵值运算, 为了观察互近似熵理论上具有的短数据窗优势, 同时也采用 2 个周波(共 512 个采样点)的数据窗进行对应比较。

4.1 电压幅值变化

假设微电网开关两侧电压的相位和频率相同, 开关两侧一侧电压保持幅值不变, 另外一侧电压幅值在基准值附近变化。选取典型电压对应的互近似熵值做分析, 如表 1 所示。

当开关两侧电压一致(表中倍数为 1)时, 互近似熵值越小, 说明此时两侧电压的波形相似度最高, 同步程度最高。当两侧电压偏离基准时, 对应的互近似熵值变大, 而且两侧电压偏差程度越高, 所对应的互近似熵值越大, 说明两侧电压的波形越不相似, 这与理论分析结果一致。

从表 1 还可以看出数据窗个数影响互近似熵值

的情况,一方面,互近似熵方法中,数据窗长度对互近似熵值的影响不是很大,采用512个采样点的数据窗也能正确反映波形的相似度情况;另一方面,采用较大的数据窗,互近似熵值具有更好的区分度。

表1 电压幅值变化时互近似熵值

Table 1 Value of mutual approximate entropy on the change of voltage value

数据窗个数	0.8	0.9	1	1.1	1.2
1024	0.364	0.263	0.129	0.285	0.382
512	0.329	0.247	0.153	0.259	0.348

4.2 电压相位变化

假设微电网开关两侧电压的幅值和频率相同,以开关两侧一侧的电压相位为基准,另外一侧电压相位在基准值附近变化。选取典型电压对应的互近似熵值做分析,如表2所示,其中,相位偏差负数表示滞后另一侧作为基准的电压相位。

表2 电压相位变化时互近似熵值

Table 2 Value of mutual approximate entropy on the change of voltage phase

数据窗个数	20	10	0	-10	-20
1024	0.442	0.376	0.213	0.354	0.426
512	0.397	0.315	0.237	0.298	0.376

由表2可见,电压相位变化时互近似熵值的变化情况与电压幅值变化时互近似熵值的情况类似,互近似熵值能正确反映电压相位变化两侧电压波形的相似度情况,也作为同步合闸的依据。

4.3 电压频率变化

假设微电网开关两侧电压的相位和幅值相同,开关两侧一侧电压频率为50 Hz,另外一侧电压频率在基准值附近变化。选取典型电压对应的互近似熵值做分析,如表3所示,其中,相位偏差负数表示滞后另一侧作为基准的电压相位。

表3 电压相位变化时互近似熵值

Table 3 Value of mutual approximate entropy on the change of voltage frequency

数据窗个数	49	49.5	50	50.5	51
1024	0.598	0.449	0.189	0.427	0.619
512	0.514	0.384	0.217	0.385	0.503

由表3可见,电压相位变化时互近似熵值的变化情况,与上述两种情况类似,互近似熵值能正确反映电压相位变化两侧电压波形的相似度情况,而且从表3的互近似熵值可以看出,电压频率变化导致的互相似熵值区间分布较大,反映了频率变化是开关两侧电压波形的相似度较低。

需要注意的是,尽管互相似熵能较好反映两侧

电压波形的相似度,但是互相似熵的绝对值物理意义并不十分明显,相似容项等参数的取值的不同,也会直接影响到最后的互相似熵值。所以在微电网合闸同步应用中只需比较互相似熵的相对值。

5 结语

本文利用单一互近似熵值就能比较并网开关两侧电压的相似度的优势,采用互近似熵方法检测微电网并网的同步问题,克服了经典的微电网并网同步检测方法实现繁琐、难以量化等问题。文中具体研究了基于互近似熵的微电网并网同步检测方法的原理、互近似熵参数取值和实现步骤。最后Matlab的仿真仿真结果证明了方法的有效性。

参考文献

- [1] 李奔, 刘会家, 李珺. 考虑网络结构优化的含风电配电网多目标重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 58-62.
LI Ben, LIU Huijia, LI Jun. Multi-objective reconfiguration of distribution network with wind power generators considering network survivability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 58-62.
- [2] 陈海东. 于细菌菌落优化算法分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 106-111.
CHEN Haidong. Optimal power flow of distribution network with distributed generation based on bacterial colony optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 106-111.
- [3] 胡文平, 于腾凯, 巫伟南. 一种基于云预测模型的电网综合风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 35-41.
HU Wenping, YU Teng kai, WU Weinan. A comprehensive power grid risk assessment method based on cloud prediction model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 35-41.
- [4] 黄文焘, 邵能灵, 唐跃中. 交流微电网系统并网保护分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 180-185.
HUANG Wentao, TAI Nengling, TANG Yuezhong. Analysis of interconnection protection in AC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 180-185.
- [5] 国家标准“微电网接入配电网系统调试及验收规范”启动[EB/OL]. [2013-07-02/2013-11-12]. <http://xinxihua.bjx.com.cn/news/20130702/443159.html>.
National standard test and acceptance guide for connecting microgrids to distribution systems[EB/OL]. [2013-07-02/2013-11-12]. <http://xinxihua.bjx.com.cn/news/20130702/>

443159. html.
- [6] 杨志淳, 乐健, 刘开培, 等. 微电网并网标准研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 66-71, 76.
YANG Zhichun, LE Jian, LIU Kaipei, et al. Study on the standard of the grid-connected microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 66-71, 76.
- [7] 蔡宇, 林今, 宋永华, 等. 基于模型预测控制的主动配电网电压控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 42-49.
CAI Yu, LIN Jin, SONG Yonghua, et al. Voltage control of active distribution network based on model predictive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 42-49.
- [8] 刘振国, 胡亚平, 陈炯聪, 等. 基于双层优化的微电网系统规划设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 123-133.
LIU Zhenguo, HU Yaping, CHEN Jiongcong, et al. A planning and design method for microgrid based on two-stage optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 123-133
- [9] 迟吉运, 韦钢, 李功新, 等. 复杂有源配电网供电路径快速优化[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 219-228.
CHI Jiyun, WEI Gang, LI Gongxin, et al. Fast optimization of power supply path for complex active distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 219-228.
- [10] 郝晓弘, 田江博, 陈伟, 等. 基于信息熵和数学形态学的电压跌落持续时间检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 30-35.
HAO Xiaohong, TIAN Jiangbo, CHEN Wei, et al. Detection method of voltage sag duration based on information-entropy and mathematical morphology[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 30-35.
- [11] 李志民, 李卫星, 李勃龙. 熵原理及其在电力系统可靠性中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(3): 37-39.
LI Zhimin, LI Weixing, LI Bolong. Entropy principle and its application in power system reliability[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2001, 13(3): 37-39.
- [12] 陈汝斯, 林涛, 余光正, 等. 计及电能质量影响的智能配电网孤岛划分策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(增刊2): 150-158.
CHEN Rusi, LIN Tao, YU Guangzheng, et al. Island separation strategy of smart distribution grid considering the effects of power quality factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(S2): 150-158.
- [13] 刘荣荣, 张靠社, 张刚, 等. 基于自适应人工鱼群算法的微电网优化运行[J]. 电网与清洁能源, 2017, 32(4): 71-76.
LIU Rongrong, ZHANG Kaoshe, ZHANG Gang, et al. Optimized operation of microgrid based on adaptive artificial fish swarm algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 32(4): 71-76.
- [14] 顾雪楠, 陈星莺, 王勇, 等. 面向源网互动的智能配电网日前调度研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 32(4): 57-63.
GU Xuenan, CHEN Xingying, WANG Yong, et al. The scheduling of intelligent distribution network for the interaction of the source network[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 32(4): 57-63.
- [15] 崔立明, 孟丽霞, 袁红. 超低排放改造及其对供电成本的影响[J]. 热力发电, 2017, 46(6): 119-124.
CUI Liming, MENG Lixia, YUAN Hong. Ultra-low emission and its effect on power supply cost[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(6): 119-124.
- [16] 曾德良, 简一帆. 火电厂负荷分配的多目标优化算法[J]. 热力发电, 2017, 46(5): 98-104.
ZENG Deliang, JIAN Yifan. Multi-objective optimization algorithm for load distribution in thermal power plant[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(5): 98-104.

收稿日期: 2016-08-10; 修回日期: 2017-07-30

作者简介:

沈冰(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统控制保护技术; E-mail: yxk20160331@163.com

肖远兴(1977—), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为广域保护;

翁利国(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为配电自动化。

(编辑 张爱琴)