

基于改进和声搜索算法的状态估计量测位置优化

电力系统状态估计是一种根据可获取的量测数据估计动态系统内部状态的方法，是能量管理系统的核心基础模块。然而由于我国配电网自动化水平低，量测装置有限，量测数据远不能满足状态估计计算需求，影响了状态估计的准确度。为了提高状态估计的准确度，优化量测位置成为研究状态估计的一个重要方面。运用和声搜索算法来优化量测位置，并对算法进行了离散化改进，增加了变量不可重复的限制。算法在IEEE-14和IEEE-33标准系统上进行了验证，并与粒子群算法进行了比较。实验结果表明，所提出的方法具有更高的准确度和可靠性，而且在时间性能上具有明显的优势。

焦润海 李玉莹/华北电力大学（北京）控制与计算机工程学院

0 引言

电力系统状态估计是电力系统调度中心能量管理的核心基础模块，其功能是通过电网实时量测信息，运用最佳估计准则计算得到最接近系统的最佳估计值，为后续高级分析提供准确的数据。实时量测信息通常包括有功功率、无功功率、母线电压值和线路电流值。然而，由于我国配电网自动化水平低，量测装置有限，获取的实时量测信息无法满足状态估计计算需求。为了保证足够的量测冗余度，引入了误差较大的伪量测数据，影响了状态估计的准确度。为了提高状态估计的准确度，量测位置的优化成为了研究状态估计的一个重要问题。

量测位置问题是离散组合优化问题，其优化方法有很多，主要包括解析法和启发式方法。文献[1-4]的优化方法都采用了解析性的方法，这类方法对

目标函数及约束域均有较强的解析性要求，在遇到目标函数不连续或难以用解析函数表达等情况时很难适应。文献[5-8]则采用了简单启发式方法优化量测位置，其中文献[5-7]提出了量测位置优化的一般方法。文献[8]则通过减少在无量测的馈线末端的电压的标准差来寻找放置给定数目电压量测的放置位置，这种方法构建了一个在一定概率条件下的低成本和强鲁棒性的量测系统。近年来，智能优化算法作为一种元启发式优化算法，被用来解决量测位置优化问题，如模拟退火法^[9]、遗传算法^[10]和禁忌搜索算法^[11]等。文献[12]提出了一种微分进化算法，以全网可观测和使用量测装置数量最少为优化目标，通过建立种群、交叉和变异等操作，进行多目标搜索，取得了较好的结果。文献[13]以提高状态估计准确度为目标，采用离散粒子群优化算法优化量测位置，大大提高了准确度。智能优化算法由于其具有全局优化性能、通用性强等优点而越来越受到研究者的青睐。本文提出了运用和声搜索（Harmony Search, HS）算法来解决量测位置优化问题，以提高状态估计的准确度。

和声搜索算法是Geem等人于2001提出的一种新型启发式智能优化算法^[14]，在求解优化问题上比遗传算法、粒子群算法和差分进化算法具有一定的优势^[15]。和声搜索算法已被应用于许多实际问题中，如解决0-1背包问题^[16]，实现人脸追踪识别^[17]，新能源发电的并网过程中



焦润海/讲师

关键词/Keywords

配电自动化 ·
状态估计 ·
和声搜索 ·
量测位置优化 ·

的PI控制器的参数整定^[18], 风力发电机和柴油发电机中调整模糊逻辑控制器的参数来确定最佳的频率和功率^[19], 配电网多目标无功优化问题^[20]等, 得到了较好的结果。本文运用和声搜索算法来解决配电网中状态估计量测位置优化问题, 并对和声搜索算法进行了离散化改进。将该算法应用于IEEE-14和IEEE-33节点配电网系统进行测试研究, 并与PSO算法进行了比较。实验结果表明, 该算法性能要优于PSO算法。

1 算法介绍

1.1 最小二乘状态估计

电力系统状态估计根据量测分布模式的不同, 有不同准则的估计算法。目前的准则一般有以下儿种。加权最小二乘准则(WLS)、非二次准则(Nonquadratic)和加权最小绝对值(WLAV)等。加权最小二乘状态估计是最早发展起来的电力系统状态估计。

在给定系统网络拓扑及其量测数据的条件下, 设系统状态变量的个数为 n , 量测量的个数为 m , 则量测量与状态量之间的非线性量测方程为

$$z = h(x) + v \quad (1)$$

式中, z 为量测量向量, $z = [z_1, z_2, \dots, z_m]^T$, 其中, z_i 为系统的第 i 个量测量, $i = 1, \dots, m$; x 为状态变量向量, $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, 其中, x_i 为系统的第 i 个状态变量, $i = 1, \dots, n$; $h(x)$ 为非线性量测函数, 描述了量测向量 z 与状态向量 x 之间的关系; v 为 m 维量测误差向量, 为零期望、方差为 σ^2 的正态分布随机矢量。

对于给定 z , 状态估计值 $\hat{x}$ 定义为使目标函数 $J(x)$ 最小的值, 即

$$J(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (2)$$

式中, R^{-1} 为权重矩阵, 且 $R_i = \sigma_i^2$ 。

将式(2)所示目标函数对 x 求偏导, 令其为零, 即

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

可得

$$H(x)R^{-1}[z - h(x)] = 0 \quad (4)$$

式中, $H(x)$ 为量测函数的雅克比矩阵, 其阶数为 mn 。

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} = \begin{pmatrix} \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial h_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_2(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (5)$$

利用泰勒级数将非线性量测函数在系统运行状态点 x_0 附近展开, 忽略二阶及以上的高阶项, 可得到线性化方程, 即

$$h(x) \approx h(x_0) + H(x_0)\Delta x \quad (6)$$

由式(4)、式(6)可得迭代方程组的形式为

$$\Delta x^k = G^{-1}(x^k)H^T(x^k)R^{-1}[z - h(x^k)] \quad (7)$$

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (8)$$

式中, $G(x^k) = H^T(x^k)R^{-1}H(x^k)$, 称之为增益矩阵; x^k 、 x^{k+1} 分别为第 k 次和第 $k+1$ 次迭代得到的状态变量。

最后, 对式(7)、式(8)利用牛顿迭代求解, 直到满足收敛判据, 就可得到系统状态的估计值 $\hat{x}$ 。

1.2 和声搜索算法

和声搜索算法是新近问世的一种启发式全局搜索算法, 在许多组合优化问题中得到了成功的应用。

在音乐演奏中, 乐师们凭借自己的记忆, 通过反复调整乐队中各乐队的音调, 最终达到一个美妙的和声状态, Z.W.Geem等受这一现象启发, 提出了和声搜索算法, 步骤如下。

1) 初始化参数。和声库的考虑概率(HMCR)、调整概率(PAR)、调整带宽(BW)、最大迭代次数MaxIter或迭代终止准确度。

2) 生成和声记忆库(HM), 根据库中和声向量求得库中向量的解 $f(x)$, 并按 $f(x)$ 优劣排序。

3) 生成新的解向量, 具体为: 生成一个随机数rand1(0, 1), 若其小于HMCR, 则变量的新值

从记忆库中取得, 否则, 变量的新值将在变量取值范围内取值; 另生成一个随机数 $\text{rand2}(0, 1)$, 若其小于PAR, 则根据BW调整变量的新值, 否则, 不做调整。最后, 求得新的 $f(x)$ 。

4) 更新和声记忆库HM, 若步骤3) 生成的新的解向量的 $f(x)$ 优于原和声记忆库中最差的 $f(x)$ 值, 则用新向量替换最差 $f(x)$ 对应的和声记忆库中的解向量, 否则, 不更新和声记忆库HM。

5) 根据是否满足终止条件, 满足则停止搜索, 不满足则重复步骤3)、步骤4)。

在和声搜索算法中, HMCR、PAR和BW是三个关键控制参数。其中, HMCR为和声记忆库的记忆概率, HMCR的值大有利于算法的局部收缩, 值小有利于群体的多样性。PAR为和声微调概率, PAR值小可以增强算法的局部搜索能力, 值大则有利于和声搜索围绕和声记忆库调整其搜索的区域, 使算法的搜索范围逐渐扩大到整个解空间。BW为和声微调幅度, BW值大使算法容易跳出局部最优, 值小则有利于算法在局部区域精细搜索。

2 和声搜索算法优化实时量测位置

2.1 基于等效电流量测变换的电力系统状态估计方法

配电系统中量测配置类型较多, 如节点的注入功率量测、支路功率量测、支路电流幅值量测和母线电压幅值量测等, 本文将各种量测等效变换为节点注入电流量测或支路电流量测, 从而使状态估计迭代方程组的雅克比矩阵成为常数矩阵, 在迭代过程中雅克比矩阵仅因子化一次^[21]。

特别指明, 当成对功率量测的有功和无功量测权重近似相等时, 可以对状态估计算法模型进行简化并快速解耦, 本文即采取该方法。

在不失一般性的前提下, 采用的模型如下。量测向量 z 由除了平衡节点以外的所有节点的注入功率和一部分支路功率构成, 在量测处理时, 节

点注入功率均为伪量测, 支路功率为实时量测; 状态向量 x 包含了所有的支路功率。

2.2 和声搜索算法的改进

和声搜索方法有其独特的优点, 其中重要的是和声搜索不需要差分梯度, 因此可以考虑连续函数以及不连续函数, 它可以处理离散变量和连续变量。同时, 和声搜索还能有效地逃脱局部最优值。

本文中, 变量定义为电力系统状态估计过程中实时量测的支路的集合, 具体数值和总的支路数有关, 而在每个变量的取值过程中, 实时量测的支路可以是任意一条支路, 则变量的取值范围为各支路编号, 为离散值。并且, 根据量测位置优化的需求, 支路集合, 也就是和声搜索的变量, 其取值不能重复。同时, 由于本文变量的取值为支路编号, 仅仅只是代表一个编号, 各变量之间并无直接关系, 微调过程并不能起到本该有的作用, 在使用了微调之后, 反而会使得和声搜索失去本身记忆库的作用, 故而本文中并不采用微调, 这样就使得和声搜索变得简单, 而最终的适用性也更强。

2.3 算法流程介绍

本文中的实验流程具体如流程图1所示。

1) 初始设置。根据实际配电网馈线的规模, 设置实时支路变量集合, 选择多种实时量测集合, 也就是和声记忆库的初始化, 同时初始化重要参数HMCR以及最大迭代次数。获取根据配电网馈线的潮流状态, 依据3.1节所介绍方法和和声记忆库中各个实时量测集合进行状态估计, 得到各集合状态量的误差ERR, 其中 $\text{ERR} =$

$$\frac{\sum_{i=1}^m \left[\frac{(\hat{x}_i - x_i)}{x_i} \right]}{m} \times 100\%$$

应的 $f(x)$ 。

2) 备选实时量测集合的获取。随机产生一个0~1之间的数 $\text{rand}(0, 1)$, 若该数不大于HMCR, 则变量的新值就在和声记忆库中随机选择, 否则变量的新值就在所有支路编号里取值。在此过程

中一定注意的是，所有变量的取值均不能重复。选择出新的量测集合之后，计算新的ERR_{new}。

3) 更新和声记忆库。由步骤2) 得到ERR_{new}，若ERR_{new}小于原和声记忆库中最大的ERR，则用产生的备选实时量测集合代替原和声记忆库中最大的ERR所对应的实时量测集合，否则保持原来的和声记忆库不变。

4) 控制循环。如果当前循环次数不大于步骤1) 中所设定的最大迭代次数，则进入步骤2)，否则停止循环，算法结束。

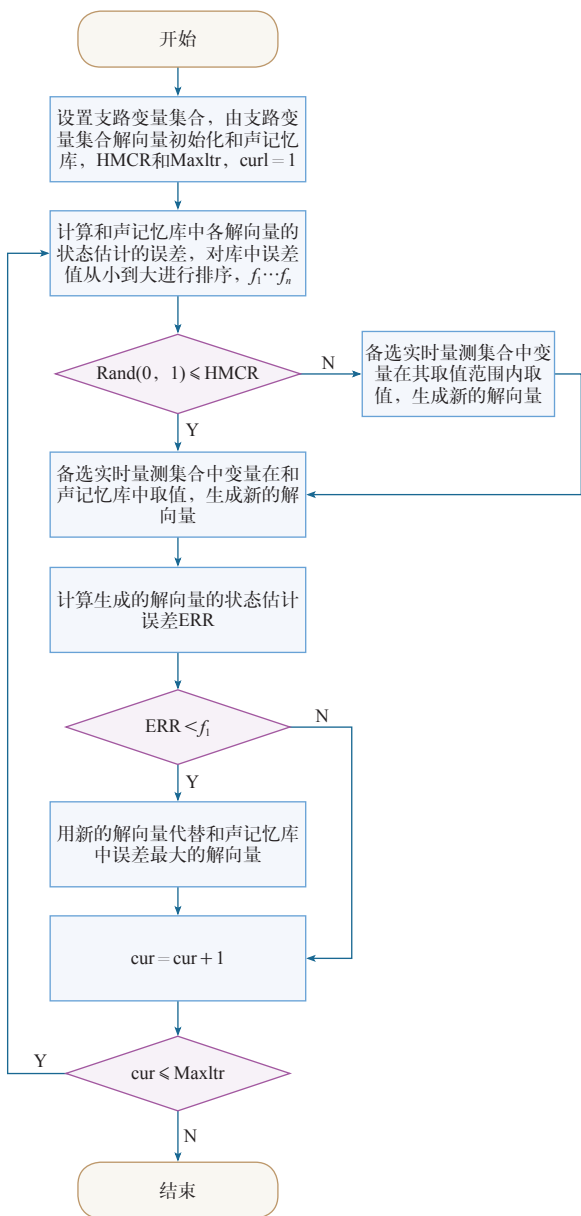


图1 改进的和声搜索算法优化状态估计量测位置流程图

3 实验结果及分析

3.1 算例数据说明

由于和声搜索算法随机性比较大，为了让数据更有说服力，采用了IEEE 14节点和IEEE 33节点系统来验证实验结果。此外，实验过程中都是经过上百次重复实验得到的数据平均值。

文中所采用的算例中，实时量测装置的数量由馈线规模来决定，同时又为了确保本文的实验方法在配电网中普遍适用，在IEEE 14节点算例中实时量测装置位置选取了3个、5个和7个，33节点算例的实时量测装置位置则选取了8个、10个和12个。算例中只含有一个电源，网络首端基准电压为12.66 kV，三相功率的基准取值为10 MV·A。

3.2 IEEE 14节点系统结果分析

在IEEE 14节点系统中，支路的个数为13，如果选择其中的3条支路放置实时量测装置，则共有286种可能的组合，所以最大迭代次数的值设置为较小的值，本实验中取值为10。此外，参数HMCR取值为0.9，和声记忆库的大小取值为12。对于选择5条支路和7条支路这两种情况，其参数取值与选择3条支路时相同。经过多次大量反复实验，最终得到的实验结果如表1所示。

表1 IEEE 14节点实验结果

实时量测装置 个数	记忆库初始最差误差 (%)	最终最优误差 (%)	提高比例
3	17.52	7.63	0.56
5	13.66	5.77	0.57
7	14.16	4.03	0.72

其中，记忆库初始最差误差为：在给定的和声记忆库中的所有初始解向量中，经过状态估计之后所得的最大的误差。最终最优误差则是在最终更新得到的和声记忆库中，选择经过状态估计之后所得的最小的误差。

表2展示了在IEEE 14节点取3个实时量测装置位置时实验过程中，得到的最小的几个误差值及其出现概率。从结果可以看出，虽然和声搜索算法是一个随机性比较大的算法，在最大迭代次数为10的情况下，和声搜索算法要得到良好的优化

效率的概率很高。由表1可以看得出，在多次实验取平均值的情况下，仍然能够达到0.56的优化率，这在初始位置不确定的时候是很有利的。

表2 IEEE 14节点系统中较好结果

误差值(%)	出现概率(%)	支路组合
5.54	2	(13, 3, 1)
6.63	4	(3, 4, 13)
6.97	4	(10, 3, 1)

为了说明所提算法的有效性和高效性，将算法与PSO进行了比较。在相同电网状态下，两种方法的实时量测位置个数均取值为3，实验对比结果如表3所示。

表3 IEEE 14节点系统 PSO与HS性能对比

算法	最终优化误差(%)	时间/s
PSO	9.09	14.68
和声搜索 (HS)	7.63	0.11

在表3中，时间统计均是在同一台计算机上完成的。与最终误差一样，时间统计也采用多次实验取平均值的方法。由表3可以看出，不管是在时间上还是在优化的结果上，和声搜索算法都有明显的优势。

3.3 IEEE 33节点系统结果分析

在33节点中，有32条支路，在选择8条支路作为实时量测值时，由于所有组合一共有1 000多万种，所以迭代次数选的相对较大为1 000，记忆考虑HMCR取值为0.9，和声记忆库的大小为30。最终结果如表4所示。

表4 IEEE33节点实验结果

实时量测装置 个数	记忆库初始最差误差 (%)	最终最优误差 (%)	优化率 (%)
8	15.71	6.91	56
10	13.12	6.13	53
12	11.94	4.74	60

从表4可以看出，不管初始位置的误差有多大，算法的最终优化结果都是比较理想的，优化率均在50%以上，这是随机优化最有利的部分，也说明了本算法的可靠性。

表5对实时量测装置个数为8时的实验中常出现的几个误差值进行统计。

表5 IEEE 33节点系统中较好结果

误差值(%)	出现概率(%)	支路组合
6.63	19	(30, 14, 6, 29, 23, 8, 13, 1)
6.73	13	(1, 23, 29, 30, 8, 6, 28, 32)
7.28	20	(6, 14, 18, 17, 13, 23, 8, 22)

值得一提的是，表5中出现的误差6.63%是在实时量测装置个数为8时所得到的所有组合中的最优情况。也就是说和声搜索算法有很大的概率取到比较理想甚至可以说是最为理想的优化结果。

为了充分说明实验的高效性，在相同的电网状态下，对状态估计方面同时采取了PSO和和声搜索算法，最终得到的结果如表6所示。从结果可以看出，得出与IEEE 14节点模型类似的结论。

表6 IEEE 33节点系统 PSO与HS性能对比

方法	最终优化误差(%)	时间/s
PSO	7.60	1 288.82
和声搜索 (HS)	6.91	12.59

3.4 和声搜索算法关键参数说明

在和声搜索算法里，它的一些关键参数的取值是一个重要的问题，影响算法的性能。本部分对参数PAR和HMCR的取值进行了讨论。对于PAR微调概率的取值问题，在和声搜索本身的问题里，是为了保证在变量取值的小范围内能得到一定的优化效率，但是对于本实验的状态估计里，由于变量本身的取值和目标函数并无直接关系，故而在取值时PAR的存在并没有什么意义。而对于HMCR的取值，实验中曾经使用过多种方式：①把HMCR定为常值；②随着迭代次数增加而增大HMCR，这样可以加强和声记忆库的作用；③随着迭代次数的增加减小HMCR，以避免在实验过程中出现和声记忆库中解向量都一样时的取值重复问题。就以上3种想法，在IEEE 33节点配置8个实时量测装置的实验中，对HMCR的不同取值做了统计。当HMCR取固定值0.9时，最终误差为6.91%。随着迭代次数增多，HMCR增大，即次数为 n ， $HMCR = 1 - 10/n$ ，最终优化后的误差为7.01%；随着实验迭代次数增多，HMCR减小， $HMCR = 0.9 - (n - 100)/9\ 900$ ，最终优化后的误差为7.24%。由此可

知, HMCR取固定值时的优化效果最佳。

在HMCR取固定值时, 实验进行了几个值的取值比较, 当HMCR取0.9的时候, 最终优化后的误差为6.91%; 当HMCR取0.95的时候, 最终优化后的误差为6.95%; 当HMCR取0.85的时候, 最终优化后的误差为7.09%, 由此比较可知, HMCR在取固定值0.9时, 优化效果最好。

4 结束语

采用和声搜索算法来解决电力系统配电网状态估计中实时量测位置优化的问题, 并对算法进行了改进。由于和声搜索算法的关键参数取值并无理论基础, 实验中往往采用随机初始化参数的方法, 这也使得和声搜索算法具有一定的随机性。本文中, 经过多次反复实验, 最终均能得到较为理想的优化效果, 说明了和声搜索算法在解决量测位置优化问题中的有效性和可靠性。同时, 通过与广泛采用的PSO算法的实验比较, 可以看出该算法在准确度上和性能上具有明显的优势。

本文在处理量测量以及状态量的过程中采取了比较简单的方式, 即以电流的形式进行处理。但在实际情况中, 还可能出现幅值、相角等形式的量测量, 也就是混合量测问题, 可作为以后研究的方向。

参考文献

- [1] Baldwin T L, Mili L, Boisen M B, et al. Power system observability with minimal phasor measurement placement [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8 (2): 707-715.
- [2] 王克英, 穆钢, 韩学山, 等. 使潮流方程直接可解的PMU配置方案研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19 (10): 14-16.
- [3] Xu Dongjie, He Renmu, Wang Peng, et al. Comparison of several PMU placement algorithms for state estimation [C]. Eighth IEEE International Conference on Developments in Power System Protection, 2004: 32-35.
- [4] 王克英, 穆钢, 陈学允. 计及PMU的状态估计精度分析及配置研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (8): 29-33.
- [5] 董文泉, 任琪, 随慧斌. 配电网状态估计的量测配置 [J]. 电气时代, 2001 (4): 30-32.
- [6] London J B A, Alberto L F C, Bretas N G. Analysis of measurement-set qualitative characteristics for state-estimation purposes [C]. Power Engineering Society General Meeting, 2005, 1 (1): 294-301.
- [7] Shafiu A, Jenkins N, Strbac G. Measurement location for state estimation of distribution networks with generation [J]. IET Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 2005, 152 (2): 240-246.
- [8] Oliveira Rocha H R, Souza J C S, Coutto Filho M B D. Planning high quality metering systems for state estimation through a constructive heuristic [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 52 (1): 34-41.
- [9] Gopakumar P, Reddy M J B, Mohanta D K. Novel multi-stage simulated annealing for optimal placement of PMUs in conjunction with conventional measurements [C]. International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2013: 248-252.
- [10] Milosevic B, Begovic M. Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (1): 69-75.
- [11] Mesgarnejad H, Shahrtash S M. Multi-objective measurement placement with new parallel tabu search method [C]. IEEE Electrical Power & Energy Conference, 2012: 1-6.
- [12] 兰华, 王韵然, 李积捷, 等. 电力系统PMU最优配置算法 [J]. 电网技术, 2007, 31 (S1): 57-60.
- [13] 黄姝雅, 刘天琪, 陈绩. 动态状态估计中PMU配置的离散粒子群优化算法 [J]. 电网技术, 2006, 30 (24): 68-72.
- [14] Geem Z W, Kim J H, Loganathan G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search

(下转第57页)

- [2] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.
- [3] 王超, 周翔胜, 汪洋. 云广 ± 800 kV直流输电工程直流测量系统异常情况分析[J]. 南方电网技术, 2010, 36(2): 36-38.
- [4] 邵震, 林睿, 张鹏. 云广特高压直流测量系统干扰因素分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 106-110.
- [5] 朱韬析, 欧开健. 逆变侧送极控主系统直流电压测量结果影响分析(一)[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2): 54-57.
- [6] 张海凤, 朱韬析. 天广直流输电系统极1电压异常波动原因及其影响分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 102-104.
- [7] 朱韬析, 欧开健. 高压直流线路电压异常波动对分接开关控制的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 152-155.
- [8] 刘占双, 石径. 直流分压器异常引起直流闭锁原因及防范[J]. 青海电力, 2012, 31(24): 102-104.
- [9] 陈宏志, 高奇, 史仰伟. 高肇直流极二直流线路电压光电传感器故障及其解决方案[J]. 现代电力, 2009, 26(5): 24-26.
- [10] 邓茜, 周培, 张宝华. 光测量系统远端模块OPTODYN抗干扰性能试验[J]. 南方电网技术, 2011, 5(3): 98-99.
- [11] 朱韬析, 何杰, 郭卫明. 南方电网直流输电系统高压直流电压波动异常及处理[J]. 电力建设, 2010, 31(5): 56-60.
- [12] 林睿. 整流侧直流电压异常波动的影响及其改进建议[J]. 南方电网技术, 2012, 6(2): 43-46.
- [13] 郝志杰, 张建设. 基于RTDS的HVDC电压波动机理研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(6): 52-55.
- [14] 欧开健. 电压测量偏差对直流输电系统影响仿真研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(1): 27-30.
- [15] 雷霄, 许自强, 王华伟, 等. ± 800 kV特高压直流输电工程实际控制保护系统仿真建模方法与应用[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1359-1364.
- [16] 朱韬析, 刘东, 郭卫明, 等. 南方电网直流输电工程的光测量系统典型异常及处理方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 147-152.

(收稿日期: 2016-11-07) EA

(上接第51页)

- [J]. Simulation Transactions of the Society for Modeling & Simulation International, 2001, 76(2): 60-68.
- [15] Kulluk S, Ozbakir L, Baykasoglu A. Training neural networks with harmony search algorithms for classification problems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, 25(1): 11-19.
- [16] Kong X, Gao L, Ouyang H, et al. A simplified binary harmony search algorithm for large scale 0-1 knapsack problems[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(12): 5337-5355.
- [17] Gao M L, Li L L, Sun X M, et al. Face tracking based on differential harmony search[J]. Iet Computer Vision, 2014, 9(1): 98-109.
- [18] Tarkeshwar M, Mukherjee V. Quasi-oppositional harmony search algorithm and fuzzy logic controller for load frequency stabilisation of an isolated hybrid power system[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 66(5): 427-444.
- [19] Ambia M N, Hasanien H M, Al-Durra A, et al. Harmony Search Algorithm-Based Controller Parameters Optimization for a Distributed-Generation System[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 246-255.
- [20] 王岩, 陈文浩, 陈筱韵, 等. 基于和声搜索算法的配电网多目标无功优化[J]. 南方电网技术, 2014, 8(5): 51-55.
- [21] 程浩忠, 袁青山, 汪一华, 等. 基于等效电流测量变换的电力系统状态估计方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(14): 25-38.

(收稿日期: 2016-11-17) EA