云广直流逆变侧直流电压测量偏低时直流系统响应特性仿真研究

针对近期云广直流多次出现因逆变侧直流电压测量值偏低导致直流系统电压异常升高的问题，结合控制策略对电压异常升高的原因进行了详细分析，并通过大量RTDS仿真试验，研究了不同故障程度、功率水平和运行方式下发生逆变侧直流电压测量偏低故障时直流系统的过电压水平和控制保护响应特性。仿真结果表明，不同的故障程度、功率水平和运行方式下直流系统表现出不同的控制保护响应特性；逆变侧直流电压测量偏低会造成直流系统过电压；大功率模式可缓解直流过电压水平；而降压运行相比全压运行工况下电压控制功能较不稳定，在故障程度较大时有系统失稳和崩溃的风险。最后，从现场运维的角度，对逆变侧直流电压测量偏低可能导致直流过电压或闭锁的风险进行评估，提出运维建议，为现场运行人员提供参考。

杨春永　黄修作　郑永武/中国质量认证中心广州分中心

杨春永/助理工程师

关键词/Keywords
高压直流输电 · 电压波动 · 电压测量偏低 · 控制策略 · RTDS仿真 ·

0　引言

随着大功率电力电子器件的发展，高压直流输电技术日趋成熟，被广泛应用于长距离、大容量输电工程[1]。南方电网所辖五省的特点是我国西部的云南、贵州，具有丰富的水电、火电资源，而用电负荷多集中在东部的广东地区。因此，高压直流输电是实施国家“西电东送”重要战略的关键技术，对于实现东西部地区资源优化配置、促进区域经济发展具有重要意义[2-3]。

高压直流测量系统是高压设备和控制保护系统连接的纽带，其将采集到的直流场的电压、电流信号通过光纤传输到控制保护系统[4]。直流测量系统故障会直接影响系统的安全稳定运行。逆变侧直流电压测量值偏低，会造成直流系统过电压，严重时可能引起保护动作，造成直流闭锁，危及设备安全。

对于直流电压异常波动的问题，已有学者做过一些相关的研究。文献[5-6]指出逆变侧直流电压测量值发生偏差是导致直流电压异常波动的原因；文献[7]分析了直流电压异常波动对换流变压器分接开关控制的影响；文献[8-10]分析了直流分压器、传感器和远端模块等引起的测量异常对直流系统的影响；文献[11-15]研究了电压测量偏差对直流输电系统的影响。这些文献都只是对故障原因进行分析，并没有研究不同故障程度、功率水平和运行方式下直流系统的控制保护特性和运行规律。

本文详细介绍了云广直流的控制策略，分析了云广直流电压异常升高的原因，并通过大量RTDS仿真试验，研究了在不同故障程度、功率水平和运行方式下发生逆变侧直流电压测量偏低故障时，直流系统控制保护响应特性。从现场运维的角度，对逆变侧直流电压测量偏低可能导致直流过电压或闭锁的风险进行评估，提出运维建议，为现场运行人员提供参考。

1　云广直流电压异常升高现象概述

2015年3～4月，云广直流曾多次出现因逆变侧直流电压测量值偏低导致直流电压异常升高的问题。图1、图2为2015年3月20日云广直流电压异常波动期间两站的直流电压波形。从图1中可以看出，整流侧最高异常电压达到812 kV（正常值为800 kV），逆变侧最低异常

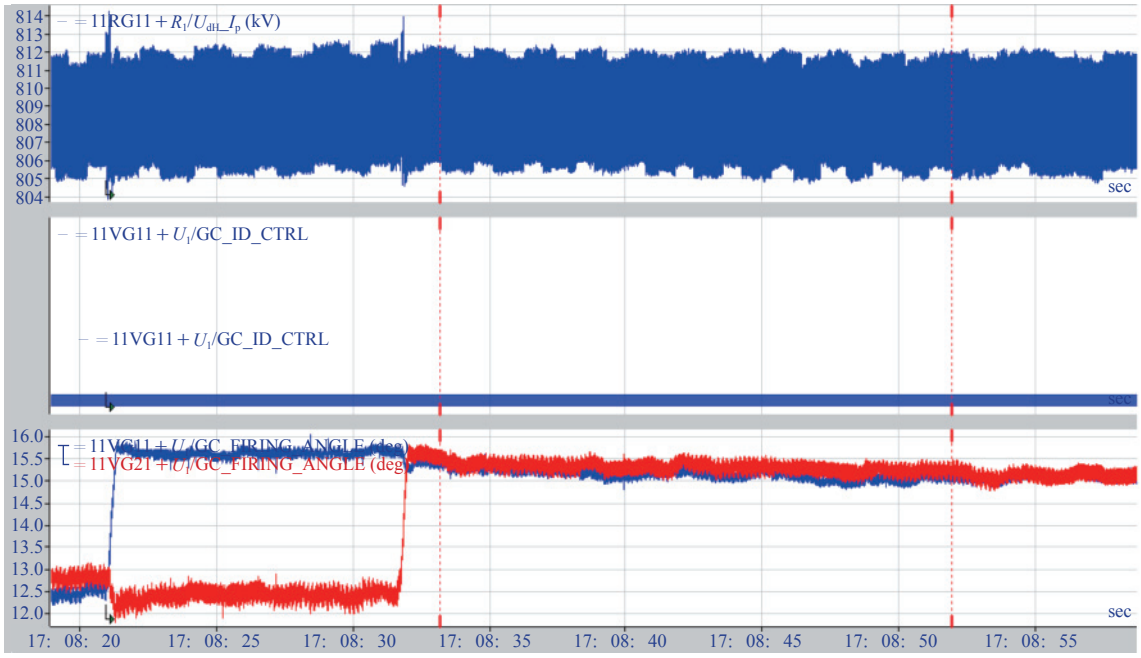

图1 整流站极1直流电压U_{dH}测量值

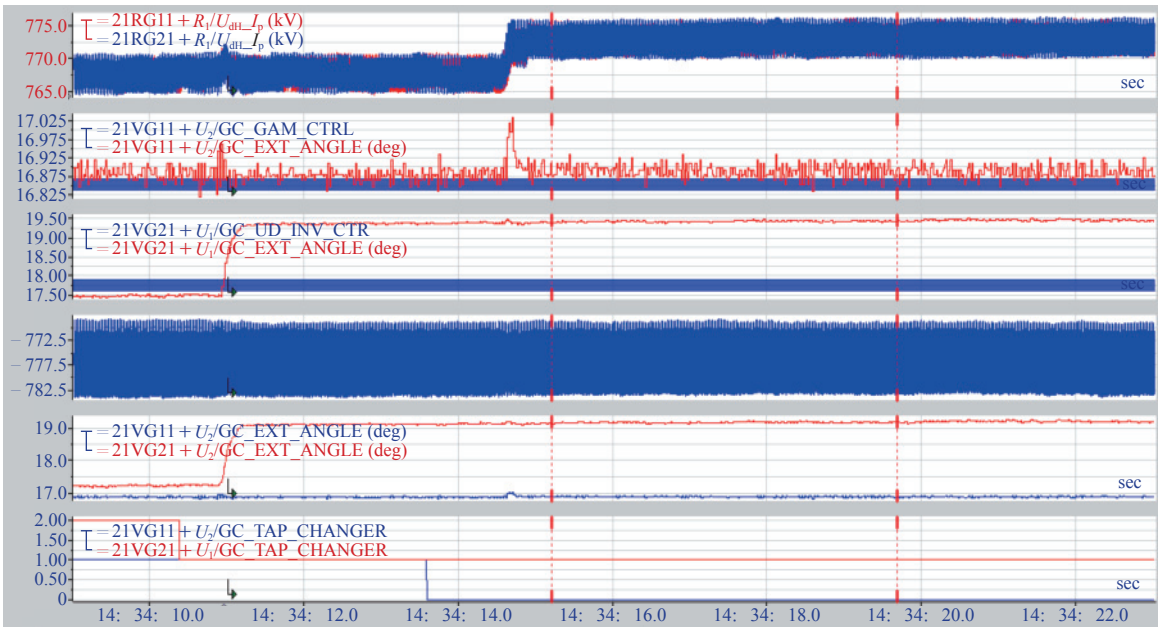

图2 逆变站极1直流电压U_{dH}测量值

电压值达到768 kV左右（正常值为780 kV）。

2 云广直流控制策略

云广直流的基本控制策略是：整流站控制直流电流，逆变侧控制直流电压，整流站的直流电压控制功能一般用于限制直流过电压。逆变侧实际上控制的是整流侧直流电压，逆变站的直流电压参考值通过整流侧直流电压减去直流线路电压降得到，逆变站通过调节本站的熄弧角实现对直流电压的控制，具体控制逻辑如图3所示。

云广直流整流站和逆变站都有定直流电流控制、定直流电压控制和定γ角控制三种控制方式。三种控制方式之间的切换是通过最大值（最小值）选择模块实现的。电流控制器、电压控制器

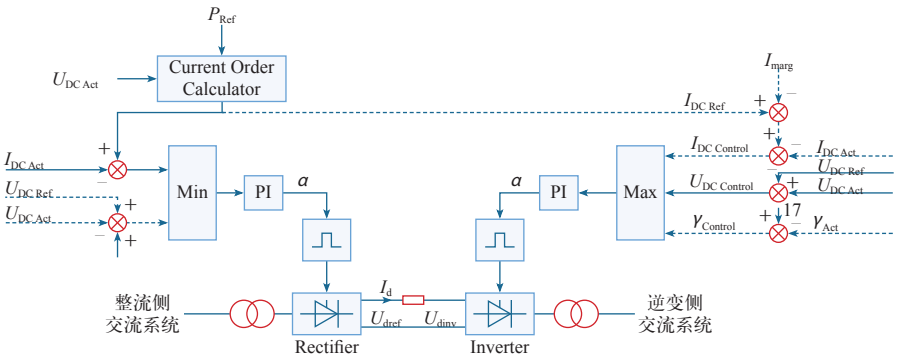

图3　云广直流控制原理图

和γ角控制器的误差分别为相应实测值与参考值的差值。通过实时比较电流控制器、电压控制器和γ角控制器三者的误差值，整流侧选择三者中的误差最小值作为当前的控制方式，逆变站则取三者中的最大值。云广直流电压控制器逻辑图和电压控制器裕度选择逻辑如图4、图5所示。

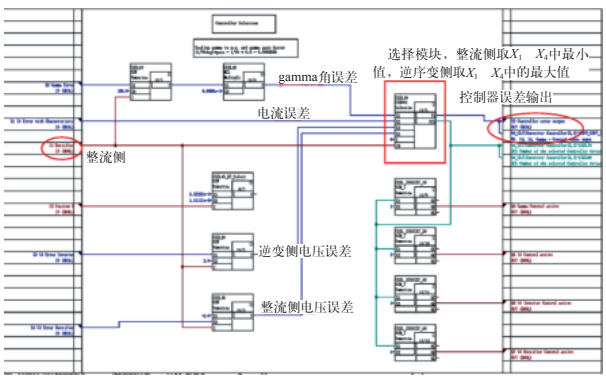

图4　云广直流整流侧电压控制器模块

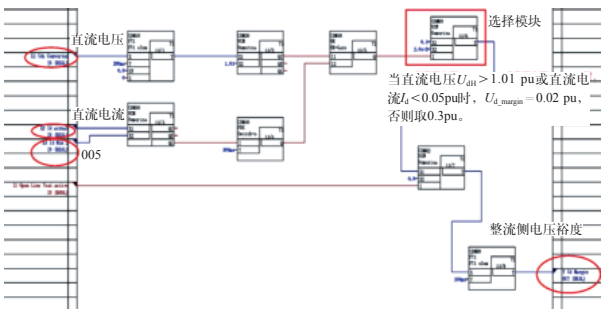

图5　云广直流整流侧电压控制器裕度选择模块

当逆变侧直流电压测量值偏低时，为保持直流电压在设定值，直流电压控制增大PI控制器输出使直流电压增加，同时触发角向90°方向靠近，分接头向低档位调整，抬高逆变侧直流电压，此时整流站直流电压同时也被抬高。

整流站直流电压控制器的参考值由额定直流电压叠加0.02 pu的裕度得到（全压和降压模式下裕度相同），故整流站直流电压控制器正常运行时不被选择，但当U_d瞬时增大到大于$U_{ref}+U_{marg}$（816 kV）时它将投入运行，保护设备安全。当整流站直流电压超过整流站电压控制器起动值，整流站由定直流电流控制立即转为定直流电压控制方式，而逆变侧电压控制器退出，转为定γ角控制方式，直流电压控制将减小PI控制器输出使触发角向90°方向增大，降低直流电压，防止直流过电压。

3　仿真试验及结果分析

利用实时数字仿真系统（Real Time Digital Simulation，RTDS）建立云广直流工程仿真模型，仿真试验系统使用同现场一致的二次控制保护设备，一次设备的运行工况利用RTDS进行模拟，并通过输入、输出板卡同控制保护屏柜相连，构成闭环的控制系统。

RTDS可以模拟直流输电工程一次设备的运行情况，RTDS计算得到电压、电流等运行参数通过IO板卡与二次控制保护屏柜实现数据交换，构成闭环的实时仿真系统。U_{dL}测量装置异常后，二次系统得到的U_{dL}测量值同实际值之间出现误差，因此U_{dL}测量装置异常可通过如下方式进行仿真模拟。

通过RTDS仿真计算，得到逆变站极1直流电压的实际值U_{dH}，在将U_{dH}通过输出板卡送至控制保护系统前，利用系数a对其进行修正，即控制保护屏柜收到的直流电压为$U_{dL}^{*}=aU_{dL}$，通过调节a的

值可模拟不同程度的测量异常故障。

3.1 逆变侧U_{dH}不同程度测量故障下整流侧过电压仿真分析

设定云广直流为双极全压大地回线运行方式，功率水平为500 MW。通过不断增加逆变站极1直流电压U_{dH}，测量装置异常程度（分别设定直流电压测量值与实际值之比为1、0.975、0.95、0.9、0.8、0.6和0.5），得到两站直流电压如表1所示。

表1 不同程度测量故障下两站直流电压与控制角

a	整流侧 U_{dL}/kV	逆变侧 U_{dL}/kV	整流侧 α(°)	逆变侧 γ(°)	整流侧换流变压器档位	整流侧换流变压器档位
1	800	796	17	20	7	3
0.98	814	780	15	19	7	0
0.975	816	776	13	18	7	−1
0.95	816	772	13	18	7	−1
0.9	816	731	13	18	7	−1
0.8	816	650	13	18	7	−1
0.6	816	487	13	18	7	−1
0.5	逆变侧27DC保护动作闭锁极1					

通过比较表1中不同程度测量故障下仿真结果可以看出，在双极全压运行方式下，整流站直流电压最高为816 kV左右（测量值与实际值之比不低于0.6），不会导致直流过电压保护（59/37DC）动作（59/37DC的动作判据为$U_{dL}-U_{dM}>416$ kV，其中U_{dM}约为408 kV左右，可知只有当$U_{dL}>824$ kV时，59/37DC保护动作）。这是因为当逆变侧直流电压测量值偏低时，逆变侧控制系统在定电压控制方式下将增大触发角以提高整流侧直流电压，同时逆变站实际电压将增大并导致直流电流减小。而整流站在定电流控制方式下，将通过减小触发角的方式增大直流电流。整流侧直流电压是由逆变站的直流电压加上线路电压降得到，即$U_{rec}=U_{inv}+IR$，整流侧的直流电压会随着逆变站实际直流电压增大，当整流侧的直流电压上升至816 kV时，整流站由定电流控制方式自动转换为定电压控制方式。换流变压器分接头档位不再下调，整流侧直流电压也不再变化，直流系统电压稳定在816 kV左右。当测量值与实际值之比低于0.6时，逆变站27DC保护会动作闭锁极1。

3.2 不同功率水平下整流站直流过电压仿真分析

设定云广直流为双极全压大地回线运行方式，逆变侧直流电压U_{dL}测量故障程度为0.9。通过不断增加直流输送功率为500 MW、1 000 MW…、5 000 MW，得到各功率点下两站极1的直流电压如表2所示。

表2 不同功率水平下两站直流电压

负荷水平/MW	直流侧直流电压/kV	逆变侧直流电压/kV
500	816	792
1 000	816	786
2 000	816	759
2 500	816	748
3 000	816	721
4 000	812	684
4 500	808	651
5 000	807	616

通过对比表2中相同故障程度、不同直流功率水平的情况下的仿真结果可以看出，直流功率较低时，功率变化不会影响整流站直流过电压水平。直流功率较高时，整流站直流过电压水平随着功率的上升而下降。

云广直流逆变站控制系统通过直流电压控制器把整流站对地直流电压控制在额定值或者降压参考值。当逆变站控制直流系统电压时，控制系统根据在逆变端测量到的直流电压、该极直流电流、直流线路电阻以及接地极线路电阻，计算整流端直流电压（整流侧极1直流电压－极1直流电流×线路电阻＝逆变侧极1直流电压），并将其维持于参考值附近。

根据图6所示的直流线路电阻计算程序逻辑可知，直流线路电阻是根据两站间的直流电压测量值U_{dH}和直流电流测量值I_{dcH}进行计算，再经过一个

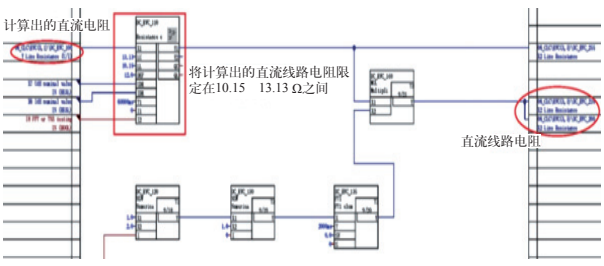

图6 直流线路电阻计算的程序逻辑图

限幅模块得到的。当直流计算出来的直流电阻R_{dc}小于10 Ω时，直流电流自动限制为10 Ω，当直流电流大于13.6 Ω时，直流电流限制为13.6 Ω，保证直流电阻在10 ~ 13.6 Ω之间。

$$R_{dc}=\left|U_{dH整流}-U_{dH逆变}\right|/I_{dH} \quad (1)$$

在大功率水平下，直流线路电阻按照式（1）进行计算。当逆变侧直流电压测量偏低时，控制器计算得到的线路电阻值和线路电压降就会偏大。在整流侧电压参考值一定的情况下，逆变侧的直流电压参考值就会偏低，从而缓解整流侧的直流过电压。因此，输送功率越大，直流电流也越大，控制系统计算得到的两站电压降相比真实值就越大，逆变侧的电压参考值越低，整流侧的过电压情况就越小。

3.3 降压运行方式下整流站直流过电压仿真分析

设置云广直流为极1降压80%、极2全压运行方式，功率水平为2 500 MW，通过不断增加逆变站极1直流电压U_{dL}测量装置异常程度（分别设定直流电压测量值与实际值之比为1、0.98、0.95、0.8和0.6），所得的两站试验数据如表3所示。

表3 极1降压80%、极2全压运行方式下两站直流电压

a	整流侧 U_{dL}/kV	逆变侧 U_{dL}/kV	整流侧 α(°)	逆变侧 γ(°)	整流侧换流变压器档位	整流侧换流变压器档位
1	640	636	26	26	18	16
0.98	653	636	23	21	18	16
0.95	673	636	18	18	18	16
0.8	721	574	14	17	14	8
0.7	408	537	12	16	13	7
0.6	逆变侧27DC保护动作闭锁极1					

从表3中可以看出，随着逆变侧直流电压测量故障程度的增加，整流站直流电压也随之升高。这是因为极1运行在大地回线80%降压的工况下，当逆变侧直流电压测量值偏低时，由于整流站电压较低，无法达到816 kV的选择条件，电压控制器不被选择，由逆变站参考错误的测量电压进行电压控制，因此当测量电压发生变化时，整流站电压也会进行调整，无法根据实际直流电压进行稳定控制。当a值低于0.8时，即出现触发角和换流变分接头频繁调节的现象；当a值低于0.6时，逆变侧27DC保护会动作闭锁极1。

在双极运行且至少有一极采取降压模式时，随着逆变侧U_{dL}测量值与真实值比a值的减小，整流站U_{dL}一直处于上升状态。当测量值与真实值比大于0.8（HMI显示逆变侧直流电压约为574 kV）时，整流站极1直流电压水平保持在800 kV以下；当a值小于0.8时，即出现触发角和分接头频繁调节的现象；当a值小于0.6时，逆变侧27DC动作导致极1闭锁。与全压运行方式相比，降压运行方式下电压控制功能较为不稳定。

4 结束语

1）云广直流逆变侧直流电压测量值偏低会导致实际直流电压上升，在整流侧造成直流过电压。逆变站直流电压测量值与实际值的偏差越大，直流系统过电压也越严重。

2）不同的故障程度下直流系统呈现不同的控制保护响应特性。在双极全压运行方式下，当故障程度较轻微时（$a\geqslant 0.9$），整流侧直流电压随着故障程度的增加而上升。随着故障程度的增加（$a\geqslant 0.5$），整流侧直流电压不断升高，当整流侧直流电压大于816 kV时，整流侧由定电流转为定电压控制方式，整流侧直流电压不再增加，稳定在816 kV，从而防止直流系统过电压。如果故障程度进一步恶化（$a<0.6$），逆变侧27DC保护动作导致直流闭锁。

3）当逆变站发生直流电压偏低故障时，直流系统过电压水平随着功率的上升而下降，建议在逆变侧直流电压测量偏低故障时尽量让直流维持在较高的功率水平。

4）降压运行相比全压运行工况下电压控制功能较不稳定，在故障程度较大时有系统失稳和崩溃的风险，建议在逆变侧直流电压测量偏低故障时避免采取降压运行方式。

参考文献

[1] 赵婉君．高压直流输电工程技术 [M]．北京：中国电力出版社，2011.

[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 withharmony search algorithms for classification problems [J]. Engineering Applicationsof 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．基于等效电流量测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