含分布式电源的链式电网地区的区域备自投控制方法研究

为提高含分布式电源地区电网的供电可靠性，提出一种考虑分布式电源和无功电源特性的适用于含分布式电源的链式电网地区的区域备自投控制方法。故障后由高频切机或低频减载装置切机组或无功源、甩有功或无功负荷，分别对频率和电压进行调节，使小电源带负荷形成孤岛稳定运行，实现远方同期直接并网；若不满足同期并网条件，解列所有上网分布式电源，由区域备自投动作并网。在PSCAD中搭建云南临沧110 kV链式电网模型进行仿真，结果表明，该方法有效增加了准同期并网成功的几率，减少了重要负荷的损失，是提高含分布式电源地区电网供电可靠性的有效手段。

冀婉舒　余向阳　南海鹏　冯博豪／西安理工大学水利水电学院
张永震／内蒙古锡林郭勒电业局

冀婉舒／硕士研究生

关键词／Keywords
分布式电源·
无功电源·
孤岛运行·
区域备自投·

0　引言

配置备自投是保证变电站供电可靠性的有效方法。在链式电网中，现有传统站内备自投动作仅能恢复开环点厂站的供电[1]，而含分布式电源接入的地方电网故障跳闸后由于小电源的支撑母线不失压，备自投拒动，易造成大面积停电事故[2]。为提高含分布式电源接入的链式电网地区的供电可靠性，站内备自投需与区域备自投配合动作，并减少分布式电源对备自投的影响。

目前，国内对含分布式电源接入的地方电网区域备自投的研究均以电网实际运行情况为基础[3]，对分布式电源备自投接线方式[4]、接入DG的备用电源投切控制[5]、分布式电源并网备自投及保护方式[6]等采取改进措施。文献[7]结合小水电特性建立系统仿真模型，提出了三种小水电孤岛运行方式控制策略，但未涉及配合备自投控制策略的研究；文献[8]针对常规备自投存在的不足，提出一种采用高频逐轮切机自动准同期自投、快速联切水电后自投功能的智能型备自投解决方案，但并未考虑低频甩负荷的可能，结论验证也未进行数据仿真。

以小电源与无功源为切入点，提出了一种适用于含分布式电源接入的链式电网地区的新型区域备自投控制方法。结合分布式电源可支持孤网运行的特点[9]，以损失最少负荷为目标，通过小电源和无功源以及区域备自投的配合，提供满足孤网运行的最优条件。最后，在PSCAD中进行了仿真验证，结果表明，所提出的区域备自投控制方法能够快速满足孤网稳定运行条件，提高远方同期合闸并网的成功率，可有效保证重要负荷的持续供电。

1　存在的问题及研究意义

对于含分布式电源接入的地方电网发生故障跳闸，现有的区域备自投控制方法是：故障跳闸后，由低频低压解列装置或区域备自投切掉所有变电站的小电源[10-11]，加速母线失压，满足区域备自投动作条件，牺牲了小电源同时导致所带负荷损失；又或是判断小电源是否可以带负荷孤岛运行，实现远方同期并网，但此方法在文献[8]中未作仿真验证，仅提出了孤岛运行的可能，未提及为满足孤岛稳定运行可采取的方法。所以本文结合分布式电源特点，提出能够

在临沧OCS系统中推广应用区域备自投在线控制新技术（051000KK52150010）。

满足分布式电源带负荷形成孤岛稳定运行的相应措施并结合实际电网情况进行仿真验证。

孤岛稳定运行条件，即为判断独立网和主网间的频率差及合环点两侧的电压差是否在并网条件允许范围之内[12]。因此，考虑在故障跳闸后对频率和电压进行调节，减小波动，快速达到孤网稳定运行对频率和电压的要求。所提出的区域备自投控制方法，通过对链式网络中负荷、分布式电源以及无功源的控制实现了上述目标，能够避免解列所有小电源、损失重要负荷。

2 链式网络区域备自投控制方法

在传统备自投类型（变压器备自投、线路备自投和母线备自投）的基础上建立适用于含分布式电源的链式电网地区区域备自投控制逻辑。通过断路器状态、流经母线电压和电流等一系列条件，生成链式网络区域备自投的控制方法，以图1所示链式网络为例。

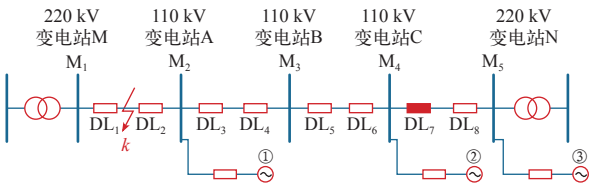


图1 110 kV链式网络系统图

2.1 区域备自投动作逻辑

链式网络中断路器DL_7为开环点，模拟在k处发生故障，保护跳闸跳开DL_1。区域备自投需首先辨别出工作开关和备用开关，再根据以下区域备自投逻辑采取相应动作[13-15]。

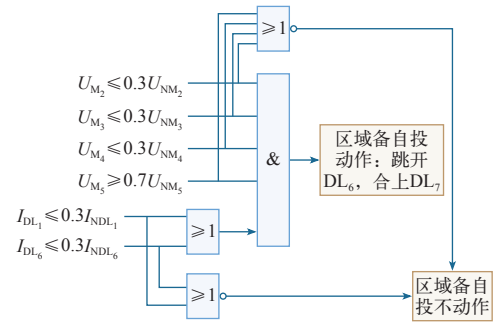
充电条件：A&B&C&D&E。其中，A为工作开关闭合；B为备用开关断开；C为工作开关紧邻母线电压值≥70%母线电压额定值；D为备用断路器紧邻母线电压值≥70%母线电压额定值；E为备用断路器对端所连母线电压值≥70%母线电压额定值。

放电条件：（A&B）|C|D|E。其中，A为备用开关闭合；B为备用断路器对端连接母线电压值≤30%母线电压额定值；C为手动分闸线路开关；D为安稳装置动作；E为开关处于检修或冷备用状态。

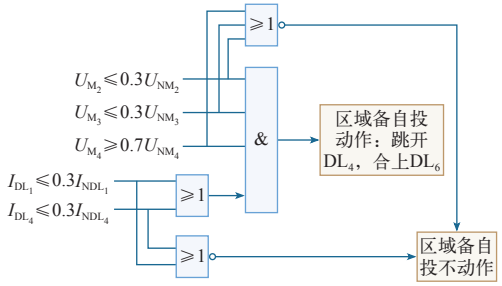
动作条件：A&B&C&D。其中，A为流经跳闸断开开关电流值≤30%正常运行电流有效值；B为工作开关紧邻母线电压值≤30%母线电压额定值；C为备用开关紧邻母线电压值≤30%母线电压额定值；D为备用开关对端所连母线电压值≥70%母线电压额定值。

动作顺序：先跳开工作开关，经延时闭合备用开关，恢复母线供电。

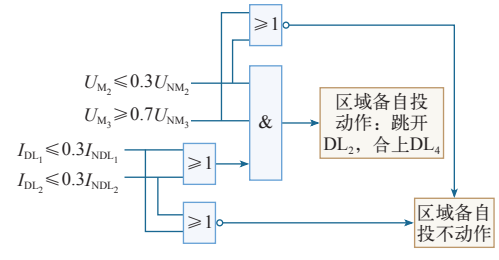
在图1中，k点发生故障后开关DL_1由保护跳开分闸，母线M_2、M_3和M_4均失电，紧邻备用开关DL_7的工作开关DL_6满足区域备自投动作条件，如图2a所示，因此跳开DL_6，经延时闭合DL_7。如果满足动作条件，如图2b所示，再跳开DL_4，经延时闭合开关DL_6。若仍满足动作条件，如图2c所示，



(a)



(b)



(c)

图2 k点故障区域备自投动作条件

再跳开DL_2，经延时闭合DL_4。此时，母线M_2、M_3和M_4恢复供电，区域备自投动作后放电[16]。

若发生母线故障如M_2故障，线路保护动作跳开开关DL_1，区域备自投会误认为是k点发生故障，因此M_2故障时区域备自投动作逻辑同k点故障，最后当DL_4合闸时，因合于故障由后加速保护再跳开。

2.2 分布式电源对区域备自投的影响及处理方法

在发生故障区域备自投判断是否动作之前，需考虑分布式电源对区域备自投动作判断的影响。一是若无压条件整定值较低，故障跳闸后由于分布式电源机组的强励支撑，导致母线电压降低量小，不满足无压条件，区域备自投不动作；二是若无压条件整定值较高，分布式电源的无功出力较小，地方电网无功负荷又较重，区域备自投会误认为母线无压而误动作。因此，在区域备自投动作前，首先判断故障点与开环点之间是否存在分布式电源，若不存在，区域备自投直接动作。

本文提出了一种通过无功电源和无功负荷、分布式电源和有功负荷、安稳装置及区域备自投相互配合的区域备自投控制方法，该方法适用于含分布式电源地区的链式网络结构，可降低区域备自投的拒动和误动的几率，并减少重要负荷的损失，保留最多可供电负荷。当存在分布式电源地区电网发生故障跳闸与系统解列后，有两种控制方法，具体流程图如图3所示。

1）基于EMS系统电网实时运行数据，通过实时潮流计算切掉无功电源或分布式电源的多少、无功负荷量或有功负荷量，高频切机、低频减载装置动作后判断独立网和主网间的频率差及合环点两侧的电压差是否在并网条件允许范围之内，是否满足孤网运行条件，若不满足，再快速联切所有上网线路分布式电源，采用区域备自投动作并网。

2）直接闭锁高频切机、低频减载装置，采集EMS系统电网实际运行数据，通过实时在线潮流计算切掉机组、无功源或负荷的多少，预判是否满足孤岛运行条件，若计算结果不满足，频率及电压波动较大，则直接解列分布式电源，加速母线失压，通过区域备自投并网。

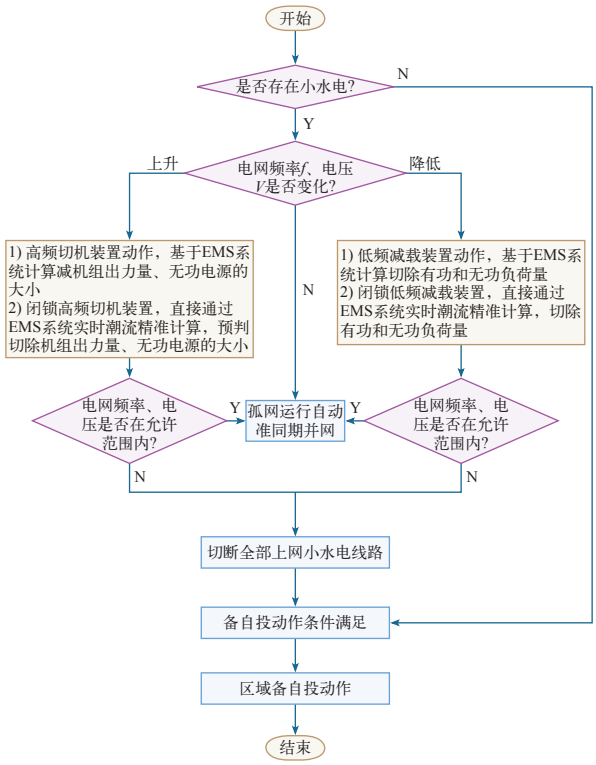


图3 含分布式电源电网地区的区域备自投控制方法流程图

2.3 动作时序

根据现阶段变电站常规通信情况，已有的区域备自投控制方法提出的孤网运行仅限于理论，实际运行过程发生故障后电压与频率波动均已超过允许范围，大部分并不能直接满足孤岛运行条件，需快速联切分布式电源，由区域备自投动作恢复供电。现有区域备自投控制方法动作时序如图4所示[17]，从故障跳闸到最终变电站恢复供电的理论实际约为14 s。

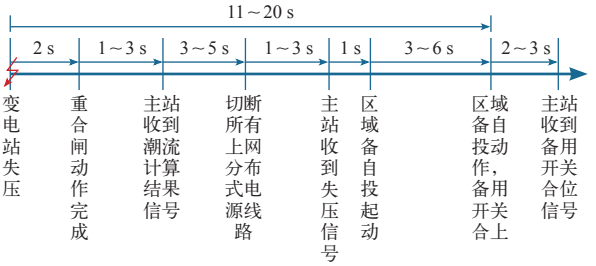


图4 区域备自投动作时序

所提出的区域备自投控制方法在已知存在分布式电源的情况下，由安稳装置通过EMS实时潮

流计算结果确定切机组、无功源和负荷量来满足孤网运行条件。原则上尽可能切掉最少机组和无功补偿装置，保留最多负荷。最终达到孤网稳定运行对频率和电压的要求，由准同期装置远方合闸并网。该区域备自投控制方法动作时序如图5所示，从故障跳闸到最终变电站恢复供电的理论实际约为10 s。

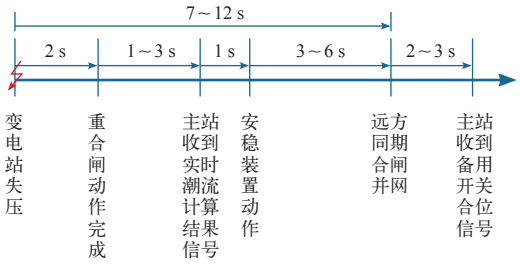


图5 新型区域备自投方法动作时序

最终电网频率较快趋于稳定，更易满足小水电孤岛稳定运行的条件，负荷损失降至最低，保留最多的可供电负荷，实现不牺牲小电源及其所带负荷就可快速恢复供电的目标，进一步缩短供电恢复时间，提高电网的供电可靠性和资源利用率。

所提出的适用于含分布式电源的链式电网地区的区域备自投控制方法，充分结合分布式电源的特性，考虑无功源与无功负荷，采用由安稳装置甩负荷、切分布式小电源或无功源，再与区域备自投相配合的方式，更易达到分布式电源带负荷形成孤岛稳定运行的条件，可有效缩短故障后恢复供电时间，保留重要负荷，实现不断电直接远方同期合闸并网，进一步提高系统的供电可靠性。

3 仿真分析

模拟临沧地区含分布式电源的链式网络实际运行情况，建立适用于含分布式电源接入的区域备自投模型，基于PSCAD仿真平台对其验证并分析。如图6所示，DL_9为开环点，仿真过程将接入低电压等级的分布式电源全部折算到110 kV侧，分布式电源、无功电源及各变电站所带负荷具体参数如下表所示。以下仿真时间设定均不计从变电站失压到主站收到实时潮流计算结果的过程。

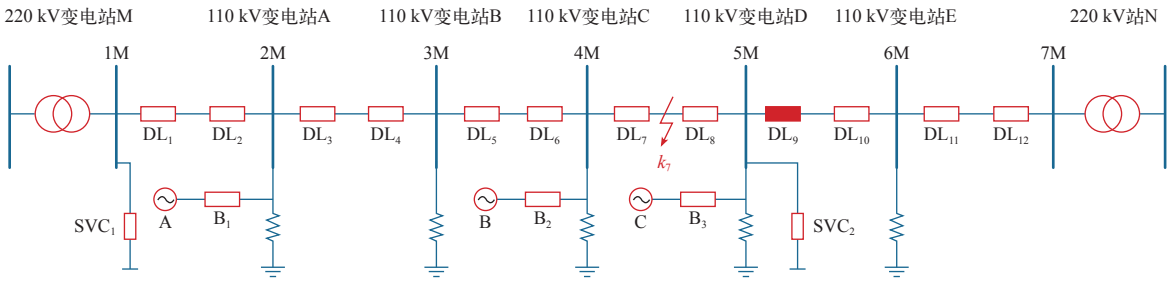


图6 临沧电网110 kV链式网络系统图

表 链式电网中各类具体参数

	分布式电源/MW	SVC/MV·A	负荷/MV·A
母线1M	–	8	–
变电站A	A：36	–	14＋j10
变电站B	–	–	12＋j7.5
变电站C	B：18.9	–	8＋j5
变电站D	C：24	17.9	15＋j8
变电站E	–	–	20＋j12.5

3.1 传统区域备自投控制方法

当系统发生故障跳闸，由区域备自投解列所有变电站的分布式电源，加速母线失压，满足区域备自投动作条件，由区域备自投并网恢复供电。

模拟$t=10$ s时，电网在k_7点发生单相接地故障，保护跳闸跳开DL_7，此时电网频率和电压值如图7所示，频率升至54 Hz，电压高达180 kV，波动已远远超出允许范围，因此解列所有上网分布式电源，区域备自投动作，投入备用电源并网，各失电母线逐级恢复供电情况，如图8所示。

3.2 新型区域备自投控制方法

当系统发生故障跳闸，为使频率和电压波动较小采取相应措施，经延时（重合闸动作时间）

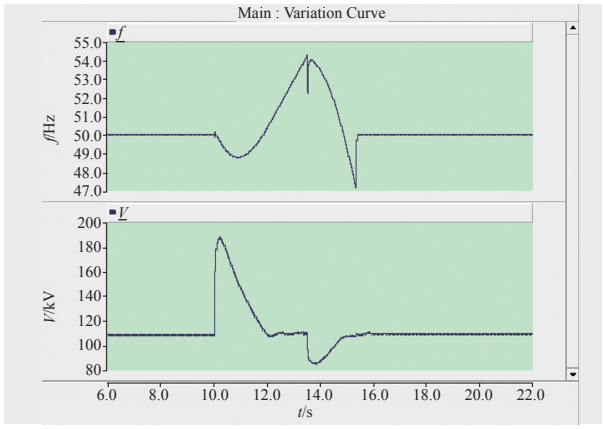


图7 采用传统方法k_7点故障后频率和电压的变化曲线

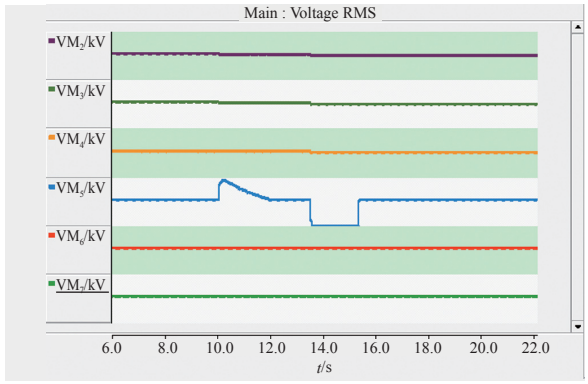


图8 采用传统方法区域内各母线电压波形图

高频切机、低频减载装置动作，通过实时潮流计算确定切掉分布式电源或无功源的多少，以及有功或无功负荷量，再根据频率和电压的波动范围判断分布式电源独立网是否能够形成孤岛稳定运行，若满足条件，则由准同期装置远方合闸开环点并网；若不满足，则快速联切所有分布式电源，由区域备自投动作并网。

模拟$t=10$ s时在k_7点发生单相接地故障，开关DL_7跳闸保护，系统频率f、电压V明显上升，经延时高频切机装置动作，切机组18 MW、无功源2.5 MV·A，电网频率和电压变化情况如图9所示，从图9可以看出。f、V的波动幅度明显减小，且均在允许范围内，满足孤网稳定运行并网条件，最终在13.5 s时由远方同期合闸并网恢复供电，各母线恢复供电情况如图10所示。

所提出的区域备自投控制方法有效抑制了故障后电网频率和电压的波动，易于使小电源带负荷形成孤岛稳定运行。通过图8、图10的对比可以

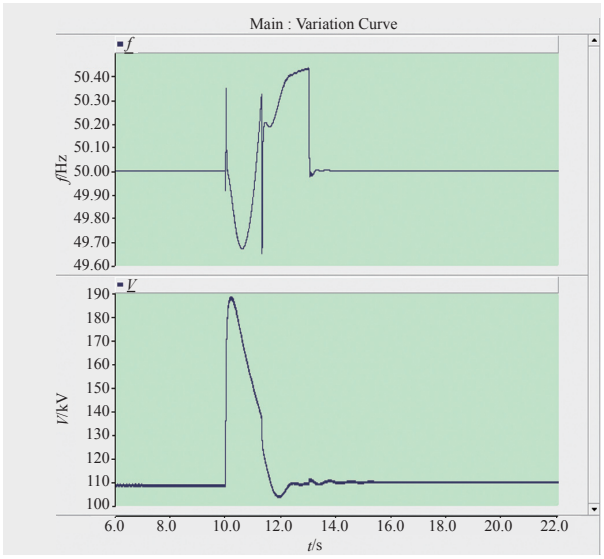


图9 采用新型方法k_7点故障后频率和电压的变化曲线

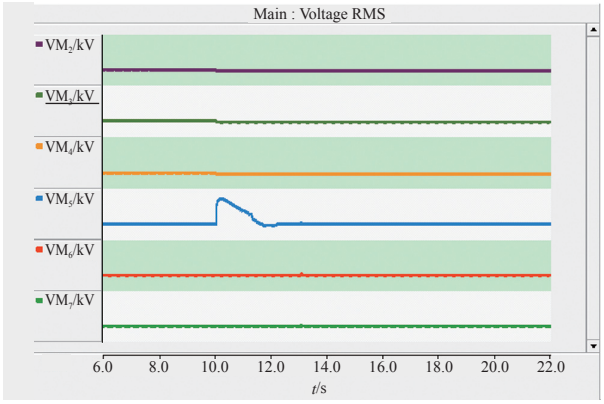


图10 采用新型方法区域内各母线电压波形图

看出，所提出的区域备自投控制方法明显缩短了故障恢复时间，有效提高了远方同期合闸并网的成功率，保留了重要负荷。

4 结束语

考虑到现有含分布式电源地区的区域备自投控制方法提出的小电源与所带负荷形成孤岛再由远方同期装置并网的思路，并网成功率较低，并会造成重要负荷的损失，提出一种考虑分布式电源和无功电源特性的适用于含分布式电源的链式电网地区的区域备自投控制方法。通过对电网频率和电压的波动采取抑制措施，充分利用小电源和无功电源调节特性，由安稳装置切机组或无功源、甩有功或无功负荷，来满足分布式电源带负

荷形成孤岛稳定运行的条件，最终实现远方同期直接并网。若不满足，再解列所有上网分布式电源，由区域备自投动作并网。解决了含分布式电源的链式电网地区的区域备自投因小电源的存在拒动或误动的问题。仿真结果表明，该方法有效抑制了故障后电网频率和电压的波动，增加了远方同期成功并网的几率，缩短了故障恢复时间，保留了更多的可供电负荷，提高了含分布式电源链式电网地区的供电可靠性。

参考文献

[1] 刘育权，刘金生，王莉，等．基于实时信息的区域备自投控制系统 [J]．电力系统保护与控制，2014，42 (17)：131-135．

[2] 郑超．地区电网广域备自投与故障恢复策略评价研究 [D]．北京：华北电力大学，2015．

[3] 陶维青，李嘉茜，丁明，等．分布式电源并网标准发展与对比 [J]．电气工程学报，2016，11 (3)：41-46．

[4] 万新强，赖勇．分布式电源备自投接线方式改进 [J]．电工技术，2016 (10)：7．

[5] 许航．含DG的变电站备用电源投切控制的相关问题的研究 [D]．合肥：合肥工业大学，2010．

[6] 付鹏武，朱锴，段振锋，等．分布式新能源并网变电站备自投及保护方式改进 [J]．青海电力，2016，35 (3)：1-4．

[7] 周倩，张志华，邵文权，等．分布式小水电孤岛运行特性分析及对策研究 [J]．电力电容器与无功补偿，2016，37 (1)：86-90，95．

[8] 陈志峰，吴勇，金滇黔．考虑山区小水电的智能型备自投装置的研究 [J]．电力系统保护与控制，2010，38 (8)：120-122，127．

[9] 吴慧军，程春田，武新宇，等．考虑小水电出力不确定性的小水电与大中型水电站群短期联合调度方法 [J]．中国电机工程学报，2016，36 (21)：5879-5889．

[10] 邹德虎，王仲达，徐柳飞，等．网络备自投系统在地调EMS中的应用 [J]．电力系统自动化，2013，32 (17)：106-111．

[11] 高崇，龚贤夫，李作红．广东110 kV电网备自投装置的应用分析 [J]．电网与清洁能源，2014，30 (8)：57-62．

[12] 陈志峰，陈娟，李海锋，等．含小水电地区电网过电压分析及抑制措施 [J]．电力建设，2015，36 (4)：21-26．

[13] 江伟，裴培，王鹏．电网仿真备自投智能建模系统 [J]．华东电力，2014，42 (3)：562-566．

[14] 李明．电网广域备自投保护的研究与应用 [D]．广州：华南理工大学，2012．

[15] 何硕佳．肇庆电网区域备自投技术的研究 [D]．广州：华南理工大学，2013．

[16] 马庆龙，熊一，周丹，等．基于孤岛检测法的进线备自投逻辑优化 [J]．云南电力技术，2013，41 (2)：16-19．

[17] 周伊琳，孙建伟，陈炯聪．区域网络备自投及其测试关键技术 [J]．电力系统自动化，2012，36 (23)：109-113．

（收稿日期：2017－11－06）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告