

低压配电网中串并联补偿装置的应用

由于用户分散且多位于偏远地区，低压配电网经常存在线损高、末端电压不稳定等供电质量问题。配电网需要采用成本较低、易于维护的方式来对电网进行改造，稳定线路末端电压。介绍了一种新的串联补偿和并联补偿综合使用的装置，通过实测数据和计算确定其元件参数。该设备采用模糊控制的方法实现自动控制投切相应电容器应对电压变化，并内置阻尼回路防止电流冲击。测试数据和仿真波形证明了其稳定电压的可行性及优点。

郑拓/国家电网南瑞集团中电普瑞科技有限公司

0 引言

农村配电网中经常出现功率因数偏低、线损偏高的运行状况，甚至出现电压骤降等供电质量问题。究其原因，主要是由于农村用电负荷结构随社会发展发生了巨大的变化，由过去的生活负荷和普通农业生产用负荷为主的结构逐渐转化为以乡镇企业感性负荷为主的结构，吸收了大量的配电网无功功率。这种情况不仅使线路损耗增加，电网被迫承受更高的输电成本，同时电能质量的下降使乡镇企业产品质量乃至其他生活用户的用电质量都很难保障^[1]。为了解决农村低压配电网中存在的这类问题，无功功率补偿是一种有效的方法。然而多数农村配电网仍依赖变电所的集中补偿，几乎没有末端补偿，这是目前农村配电网无功补偿上的重要缺陷，也为提升配电网容量和输电质量留下了发展的空间^[2]。本文以上海奉贤驰21团泾线路补偿装置为例，综合介绍和应用一种新的串并联无功补偿装置，达到稳定配电网末端电压、增大容量的目的。



郑拓/助理工程师

关键词/Keywords

配电网 ·
串并联 ·
无功补偿 ·
模糊控制 ·

1 设计思路

为10 kV配电网无功综合控制装置配置参数，首先需要对配电网进行潮流计算，了解其末端需补偿的电压水平和所需无功，对配电网系统运行情况和负荷情况进行分析，对谐波等电能质量指标进行评估。根据以上获得的系统及线路参数初步确定所需串联补偿电容器的结构、参数以及保护等。根据系统负荷的大小、性质以及系统短路电流容量等进行并联补偿电容器参数计算，针对谐波及负荷情况设计与并补电容器串联的电感参数，并依照实际投运情况进行仿真谐波计算，同时进行系统阻抗频率特性仿真计算，对串联并联电容器在谐波影响下的安全裕度进行校核计算。

2 接线图及拓扑结构

10 kV配电网串并联综合无功控制装置主要由串联电容器支路及并联电容器支路组成，装置置于户外柱上运行。由于柜内设备受空间的约束，同时又需要保证相关设备电气性能，串联电容器采用4并1串/相，即每两台串联电容器为1组，4台共两组，两组导线互为反相穿过穿心式电流互感器，使正常运行时磁通和为零，不触发保护动作。

10 kV配电网串并联综合控制装置主接线如图1所示。

图1中点画线框以内设备放置于柜体中，以外设备置于柱上。将放电阻尼电抗器置于主放电回路中，不再专设放电回路，既起到了放电时保护电容器的作

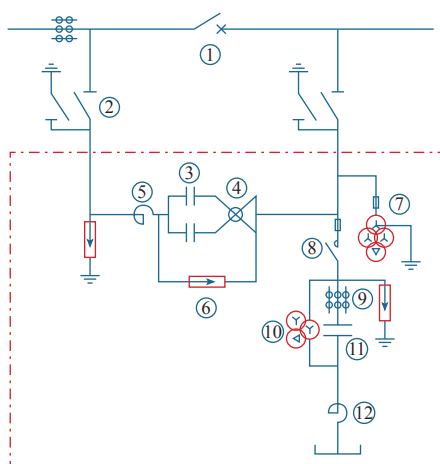


图1 10 kV配电网串并联综合控制装置主接线

- 1—快速真空开关 2—柱上隔离开关 3—串联电容器
4—穿心式电流互感器 5—阻尼电抗器 6—氧化锌避雷器
7—电压互感器 8—真空接触器 9—电流互感器 10—放电线圈
11—并联电容器 12—串联电抗器

用,又可以节约空间,同时阻尼电抗还可以对主回路的电容器参数进行调整。并联电容器支路与串联电容器共同使用一个隔离开关,必须同时检修,避免了串联或并联电容器单独损坏时的带电检修,提高了安全性,而且节约了空间。旁路开关采用快速真空开关,在故障时闭合时间短于12 ms,参数充分考虑了串联电容器及氧化锌避雷器故障时的耐受情况。并联电容器采用真空接触器进行投切,占地面积小,投切可靠灵活。

3 系统数据计算

根据奉贤供电公司提供的设计资料、线路数据结合测试所得数据进行等效计算,可得驰21团泾线路总负荷变安装容量为17 773 kV·A,实际测试的最大负荷容量为4 623 kV·A,负载率为26%。根据设计资料提供的最大电流334.58 A,计算得此条件下负荷总功率为5 795.3 kV·A,负载率为33%。综合考虑,设计时负载率统一按33%考虑。根据所选的设计负载率结合各杆上变压器的安装容量和实际测试数据,功率因数按0.9考虑。综合以上数据,使用PSCAD进行仿真,仿真电路如图2所示。电源电压按10.5 kV考虑,1(pu)为10 kV,经计算,送电线路始端电压为1.04(pu),

末端电压为0.973(pu),仿真波形如图3所示,其中较高的 V_1 为始端电压,较低的 V_2 为末端电压。

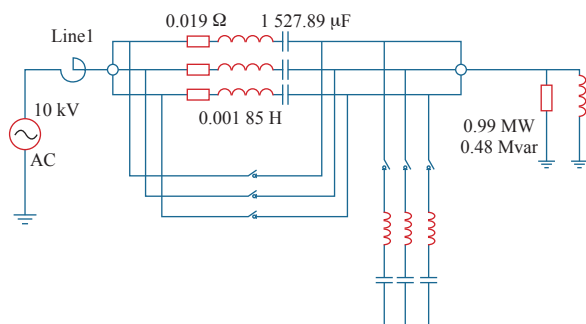


图2 系统仿真主电路

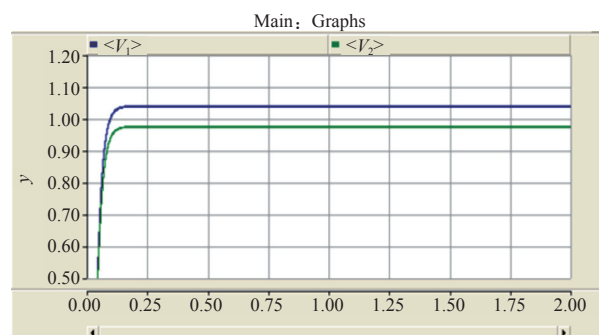


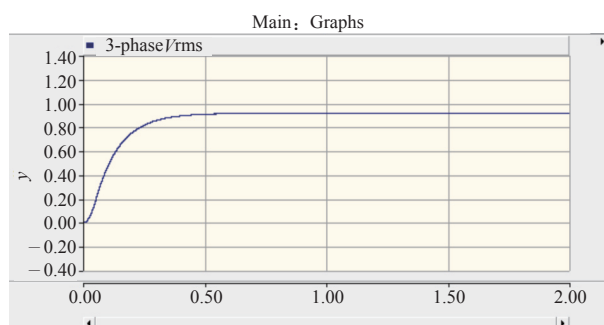
图3 始末端电压仿真波形

3.1 串联电容器参数设计

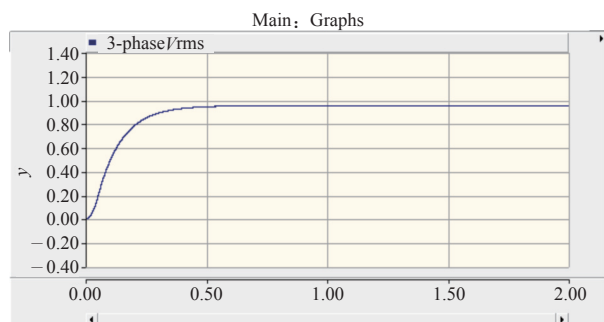
电容器参数需要考虑到最大负荷电流、系统故障电流以及绝缘配合等因素。驰21团泾线路始端最大短路容量为230 MV·A,线路末端(127号杆)距线路始端约6 km,经计算,末端最大短路容量为35.28 MV·A,系统故障电流为2.04 kA。末端计算负荷约为1 130.85 kV·A,负荷电流为65.3 A,功率因数按0.9考虑。经综合考虑线路补偿度取60%左右,串联电容器投入运行后,末端电压由0.973(pu)提高到0.981(pu),电压提高80 V,串联电容器投入后末端短路容量增加至74.92 MV·A,短路电流增加为4.33 kA。串联电容器投入前后仿真波形如图4所示。

3.2 并联电容器参数的设计研究

并联电容器的作用主要为支撑线路末端电压,设计时需要考虑负荷大小、末端系统短路容量以及电压控制上的需要。末端无功较小,只有481.16 kvar,如果据此决定并联电容器的容量则调压效果不好,因此需综合考虑系统强度及电压控制



(a) 串联电容器投入前末端电压波形



(b) 串联电容器投入后末端电压波形

图4 串联电容器投入前后末端电压波形

方面的需求。串联电容器补偿后，系统最大短路容量为74.92 MV·A，最小短路容量为59.91 MV·A，根据现场实际测试，整条线路需要的无功功率为1 788.4 kvar，最终将并联电容器的补偿容量设计为1 000 kvar，考虑到现场测试5次谐波较多，将并联电容器支路串抗率取为6%。

最大短路容量下电压抬高，即

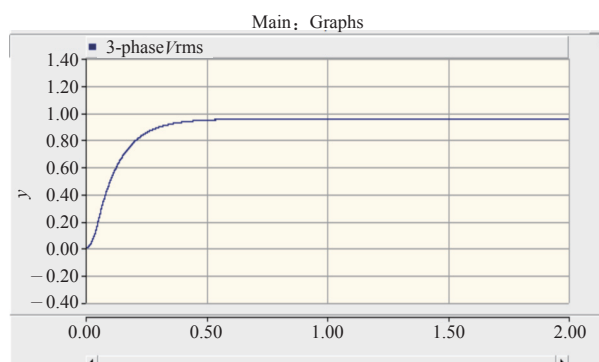
$$\Delta V_2 = \frac{Q_c}{S_{dmax}} = \frac{1}{74.92} = 1.33\% \quad (1)$$

最小短路容量下电压抬高，即

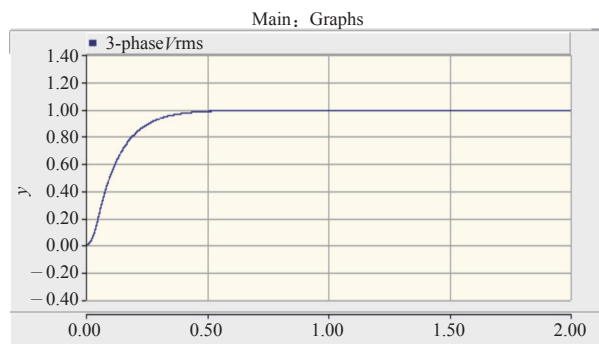
$$\Delta V_2' = \frac{Q_c}{S_{dmin}} = \frac{1}{59.91} = 1.67\% \quad (2)$$

3.3 串并联电容器的综合仿真效果

造成线损的主要因素为线路电抗，引入容抗能够有效地减小线损，即串联电容器在运行时可以减少线路电抗。并联电容器投入运行后提供线路末端无功支撑，有效改变系统无功功率容量和分布。通过系统补偿和单端补偿两种方式同时作用，效果相对单一补偿有更好效果。图5为串并联补偿同时运行后的补偿效果，在投入前末端电压为0.973(pu)，投入后电压提升为0.992(pu)，电压



(a) 串并联补偿同时投入运行前的末端电压



(b) 串并联补偿同时投入运行后的末端电压

图5 串并联补偿同时投入运行前后的末端电压

提升约190 V。

3.4 放电电阻电抗器的参数设计

串联电抗器在既有设计中起到放电阻尼电抗的作用，避免隔离开关、真空开关都在闭合的状态下所形成回路中串联电容器放电电流超过设备限定值。正常流过串联回路的负荷电流为65.3 A，由计算可知在串联电容器上的压降不足150 V，正常放电对电容器及串联回路不会造成影响。故障时，由于串联电容器上电压分布较高，在快速真空开关旁路装置后形成的回路中会形成很大的冲击电流，因此使用的阻尼电抗器需要有一定的电感值，可以将系统故障中的放电冲击电流降低到可接受水平。与此同时，电抗器还需要有一定电阻和品质因数来加快放电电流的衰减。故障时放电电流波形如图6所示，放电电流峰值小于3 kA，此电流水平在设备耐受范围之内。

4 设备控制策略

串并联无功综合控制装置设计的初衷在于提

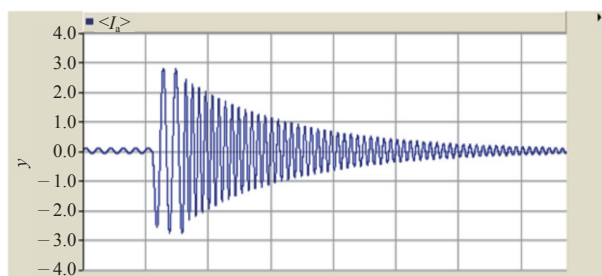


图6 系统故障后的放电电流波形

供一种新的低压配电网无功功率解决方案,利用串联电容器和并联电容器的不同作用,分别从系统补偿和负荷补偿两个方面共同解决线路损耗和供电质量问题,其中保证供电质量作为主要目的。

在串并联无功综合控制设备中有两组电容器需要进行投切操作,为避免在维持某个电压值情况下发生频繁投切反而引发电压振荡,需要采用模糊控制的方法对控制策略进行改进。模糊控制相对于PI等准确控制方式的优点是输入信号范围较大,对短时频繁小范围变化的输入可以保持输出量稳定。这样既可以避免频繁的投切操作引发不必要的振荡,又降低了控制设备的制造维护成本。

从电压控制的角度来看,设备应当将线路末端电压维持在标幺值1.0(pu)附近,而设备共有两套电容器装置可供控制,故采用以下策略:当末端电压降至0.8(pu)或以下时,投入全部电容器;当电压达到1.0(pu)时,切除串联电容器,继续保留并联电容器;当电压达到或超过1.1(pu)时,切除全部电容器。由于切除和投入电容器过程本身会带来电路的暂态过程,因此采用模糊控制的方法,将三个电压1.1(pu)、1.0(pu)和0.8(pu)都加上 ± 0.05 (pu)的区间,当电压在此三个区间内变化时,电容器不动作;当电压升高或降低至离开区间时,再分别对电容器进行动作。

在模糊控制系统中,受控的装置需要非模糊量输出的准确值进行控制,而输入量和输出量均为模糊量。在控制的实现过程中,首先需要对实时电压值进行准确采集,然后将其与标准值作差得到电压误差,模糊化后得到相应数据再查询表中的位置,进而得到输出量模糊值,然后非模糊化得到是否投切的准确值,其流程如图7所示^[3]。

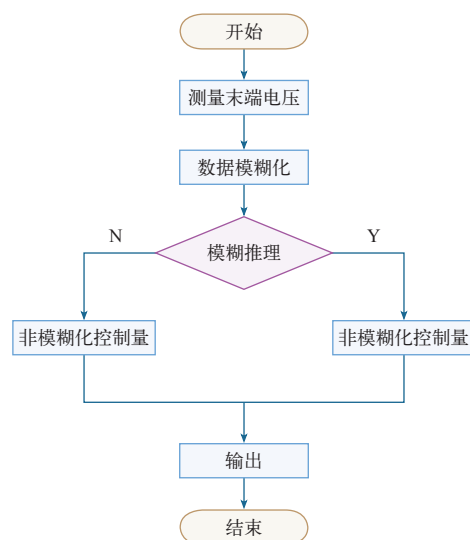


图7 模糊控制流程

本系统属于双输入双输出的模糊控制系统,输入量为实时三相电压有效值同标准电压的差值和电压有效值变化导数,以电容器组投切开关值为输出量。

4.1 模糊化输入量

将准确量(数字量)转换为模糊量的过程称为模糊化或模糊量化^[4]。将准确量离散化成模糊集合,模糊集合分为若干集合: {NB(负大), NM(负中), NS(负小), O(零), PS(正小), PM(正中), PB(正大)}。采用如下公式模糊化

$$y = 12 \left[x - \frac{a+b}{2} \right] / (b-a) \quad (3)$$

本系统采用基本论域 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。取电压值误差范围为 $\{-U, +U\}$,电压变化率误差范围 $\{-1, +1\}$,输入量的基本论域为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。输入量模糊化时选择电压比例因数 $K_v = 12/U$,电压导数比例因数为 $K_s = 12/U$ 。同理可得输出量比例因数 $K = 12/U$ 。

4.2 输入量隶属度

一般隶属函数采用梯形法或三角形公式法等进行定义,但鉴于本系统需要控制的量较少,

可以简化设计,故采用三角形公式法模拟正态分布,即

$$u(x)=\begin{cases} 1 & x=b \\ 0 & x\geq b, x\leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a<x<b \\ \frac{c-x}{c-b} & b<x<c \end{cases} \quad (4)$$

输入量近似取整,模糊化采用查表的方法,所使用的隶属函数赋值表存储在系统控制器中,如下表所示。

表 输入量 V_{in} 、 S 隶属度赋值

F	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
NB	1	2/3	1/3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	1/2	1	2/3	1/3	0	0	0	0	0	0	0	0
NX	0	0	0	1/2	1	1/2	0	0	0	0	0	0	0
ZR	0	0	0	0	1/3	2/3	1	2/3	1/3	0	0	0	0
PS	0	0	0	0	0	0	0	1/2	1	1/2	0	0	0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	1/3	2/3	1	1/2	0
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1/3	2/3	1

4.3 控制规则

该控制系统为双输入双输出模糊控制器,采用控制规则格式为

If $V_{in} = M$ and $S = N$ then

$B_1 = X$

$B_2 = Y$

V_{in} 及 S 为电压误差及其变化率; K_1 和 K_2 为电压和电压导数向模糊集转化的量化因子; B_1 、 B_2 为两套补偿装置投切开关量; M 、 N 为 V_{in} 和 S 对应模糊集的子集; X 、 Y 为 B_1 、 B_2 对应的模糊集的子集。

4.4 非模糊化方法

在模糊控制的原理中,模糊控制需要按照规则进行模糊推理才能推断出输出控制量的模糊子集,而这个模糊子集并不是适合于控制受控对象的准确量。将模糊量转换为准确量的过程称为非模糊化。非模糊化方法同模糊化方法数量相比种类较多,主要有重心法、加权推理法、函数推理法、最大隶属度法和中位数法等。本系统采用最大隶属度法,这种方法简单易行,算法实时性

好,不需要在控制器中额外添加存储单元,而且能够突出隶属度最大元素的控制作用,忽略隶属程度小的元素的影响,使需要的信息更为简化。

4.5 实现效果

对实时三相电压有效值和变化率进行采集,分别乘以 K_V 和 K_S ,得到对应论域元素在查询表中的位置,进而寻找到输出量的模糊值,将其非模糊化即可得到投切电容器的开关信号值。

使用模糊控制器后,再次针对其控制效果进行仿真,如图8所示。在1.0 s时闭合刀开关,开始按正常负荷运行;3.0 s时投入双倍正常末端负荷,电压有所降低,但在补偿器作用下并未降低到0.95(pu)以下;在4.0 s时插入时长为0.5 s的三相故障,系统从故障开始到恢复耗时约1.0 s,双倍正常负荷在控制策略作用下电压依然没有出现过多波动,证明模糊控制策略在该系统中是可靠的。

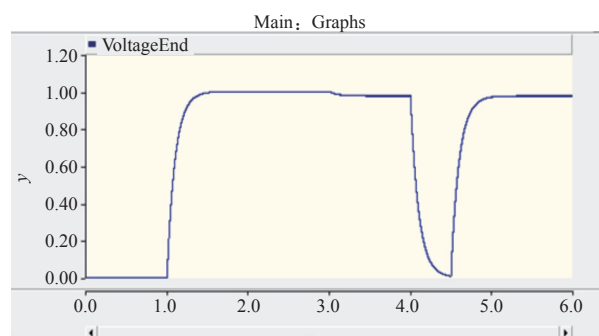


图8 采用模糊控制器后仿真线路末端电压波形

5 结束语

根据以上仿真结果和分析,在配电网中采用串并联综合无功补偿装置能有效支撑线路末端电压,稳定供电质量。从已有的工程实例来看,补偿装置中采用串补措施可以在大功率用电设备投入时降低40%的配电网电压跌落^[5]。相对已有的多组并联电容器逐级投切装置,其优势是串补电容器能够在一定程度上减少线损,而且单独的串补电容器应对负荷波动能力较差,同并补电容器共用能改善这种情况^[6]。同时,结构简单,维护方便,投资较小,适合在低压配电网中推广。

(下转第32页)

各监测信息融合和关键指标获取,利用FMECA分析使变压器诊断流程规范化,利于实现领域知识和计算机的深度融合。实例表明,该方法能够解决多源信息融合和关键指标难以量化等问题,且诊断过程规范,结论可靠,工程应用价值大,为实现变压器的精益化检修打下了基础。但本方法涉及多个状态量指标转化的问题,在下一步研究工作中应加强状态量之间的相关性研究,可提高变压器故障诊断效率,使其发挥更大的工程价值。

参考文献

- [1] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等.从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J].电力系统自动化,2014,38(15):1-11.
- [2] 杨志超,张成龙,吴奕,等.基于粗糙集和RBF神经网络的变压器故障诊断方法研究[J].电测与仪表,2014,51(21):34-39.
- [3] Zhao C, Dujic D, Mester A, et al. Power electronic traction transformer—Medium voltage prototype[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3257-3268.
- [4] Beykverdi M, Faghihi F. A new approach for transformer incipient fault diagnosis based on

dissolved gas analysis (DGA) [J]. Nova Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016, 3(2).

- [5] 臧状,张彬,李辉,等.变压器铁心振动特性分析与研究[J].东北电力技术,2014,35(7):1-6.
- [6] 孟令闻.基于FMECA的电力电缆故障分析方法[J].河北电力技术,2015,34(1):15-17.
- [7] Malik H, Mishra S, Mittal A P. Selection of most relevant input parameters using waikato environment for knowledge analysis for gene expression programming based power transformer fault diagnosis [J]. Electric Power Components and Systems, 2014, 42(16): 1849-1861.
- [8] 姚森敬,文正其,张林,等.一种变压器状态评估中的状态量优选方法[J].中国电力,2014,47(8):8-12.
- [9] 郑含博,王伟,李晓纲,等.基于多分类最小二乘支持向量机和改进粒子群优化算法的电力变压器故障诊断方法[J].高电压技术,2014,40(11):3424-3429.
- [10] 刘凯,彭维捷,杨学君.特征优化和模糊理论在变压器故障诊断中的应用[J].电力系统保护与控制,2016,44(15):54-60.

(收稿日期:2016-10-13) **EA**

(上接第26页)

该装置设计容量远大于实际应用容量,设备整体裕度较高,在仿真中得到了体现,能够应对绝大多数情况,不易损坏。这种设备的结构和控制策略具有较高的扩展潜力,在现行配电网中有很大的发展空间。

参考文献

- [1] 洪锐辛.浅谈无功补偿在配电网的应用[J].科学时代,2013(4).
- [2] 李菲.低压配电网无功补偿方案的选择[J].农电技术,2014,22(9).

- [3] 弥龙飞,弓千让,王永宁,等.模糊控制在无功补偿中的应用[J].西北大学学报:自然科学版,2010,40(5):802-805.
- [4] 李士勇.模糊控制[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2011.
- [5] 卓谷颖,江道灼,梁一桥,等.改善配网电压质量的固定串补技术研究[J].电力系统保护与控制,2013(8):61-67.
- [6] 李海霞.清油河地区10 kV无功分散补偿研究[D].北京:华北电力大学,2014.

(收稿日期:2015-11-06) **EA**