

小电流接地系统单相接地故障选线的研究

索南加乐, 薛晓辉, 高峰, 顾嘉, 邓旭阳
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了提高现有的基于模型参数识别的小电流接地系统故障选线方法的灵敏度和可靠性, 将线路等效成母线侧对地电容和负荷侧对地电容不相等的 Π 模型. 在改进的 Π 模型中, 母线侧对地电容为线路零序电容的一半, 负荷侧电容受系统运行方式影响为未知量, 该处理使单相接地故障选线模型更接近实际. 该模型的数学方程变为线性方程, 易于准确求解. 利用积分方程求解该模型参数, 有利于抑制高频分量, 降低对滤波器性能的要求, 使识别出的参数更加稳定准确, 提高了选线的灵敏度和可靠性. 利用 EMTP 仿真和现场录波数据验证了文中方法的正确性和有效性.

关键词: 小电流接地系统; 故障选线; 参数识别

中图分类号: TM727; TM773 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)04-0471-05

Fault Line Selection in Non-Solid Earthed Network

SUONAN Jiale, XUE Xiaohui, GAO Feng, GU Jia, DENG Xuyang
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve sensitivity and reliability of fault line selection in non-solid earthed network based on the model identification, a new Π model with unequal capacitances is presented, where the capacitance of bus-side equals to half of the zero sequence capacitance value of the line, and the capacitance of load-side is unknown which depends on the operation mode of the power system. Then the equation of the Π model gets linear which can be solved easily. Integral algorithm is chosen to restrain high-frequency component to lower the performance requirements of filter and the identified parameters become more accurate. Thus the sensitivity and reliability of fault line selection are improved. The validity of this proposed method is verified via EMTP simulator and fault recorded data.

Keywords: non-solid earthed network; fault line selection; parameter identification

在小电流接地系统发生单相接地故障时, 由于故障点电流很小、电弧不稳定等原因, 接地选线的问题一直没有得到圆满的解决^[1]. 基于不同选线原理已经推出了几代产品, 但实际应用中的效果并不理想, 所以这个问题仍有研究的必要.

基于故障暂态信号的检测方法灵敏度高且不受消弧线圈影响^[2]. 利用暂态电压、电流初始极性关系的首半波法, 由于极性关系正确的时间非常短(远小于暂态过程), 且受线路结构和参数影响, 检测可靠性较低. 近年来, 随着高速数据采集与信号处理技术的发展, 基于暂态信号的检测方法重新吸引了学术

界关注, 但大多集中在小波变换等新兴数学分析工具的应用上^[3-5], 对配电网数学模型特征的分析利用还缺乏足够的重视. 文献^[6]提出的基于模型参数识别的选线原理耐过渡电阻能力强, 不受消弧线圈和间歇电弧影响, 具有自举性, 可以和馈线保护合为一体, 满足配电自动化的要求, 但选线的灵敏度和可靠性有待进一步提高. ①该选线方法所建立的线路 Π 模型两侧的电容都为未知量, 所得的是非线性方程, 准确求解非线性方程困难. ② Π 模型中母线侧的 C_{01} 不能反映实际系统中线路负荷侧负荷变压器等元件的影响. ③微分计算方程系数会放大高频分量

的影响,而小电流系统单相接地故障暂态过程中,接地电容电流的高频分量高达工频量的十几倍到几十倍,完全滤除不符合模型的高频分量对低通滤波器性能要求很高甚至不可能。

本文在系统线路参数已知时,依据配电网的特点,提出了更为接近实际的故障迭代模型,使识别出来的健全线参数更加稳定准确,提高了选线的灵敏度和可靠性。EMTP 仿真和现场数据验证了文中方法的正确性和有效性。

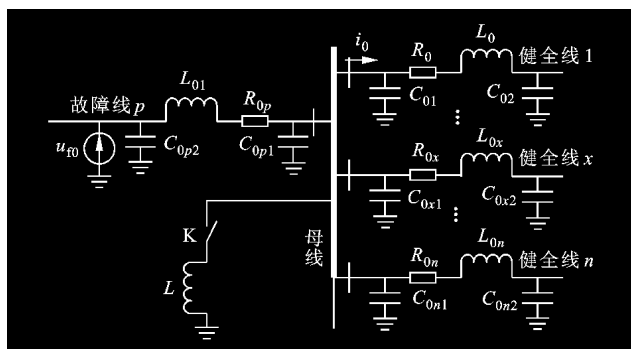
1 故障模型的建立

实际配电网线路多呈树形结构,带很多分支。这些分支线路以及负荷变压器、负荷开关后线路等元件的分布电容对线路负荷侧的对地支路是有一定影响的,不能忽略,把这些影响等效成一个量值未知的电容叠加到线路 II 模型负荷侧的对地电容上。线路 II 模型母线侧的对地电容取一个定值(典型值取为线路本身对地电容的一半)作为已知量。这样,线路的 II 模型两侧对地电容值就不再相等,且有 $C_{01} < C_{02}$ 成立。这种经过改进的模型更加接近实际系统,更准确。

一个具有多条出线的中性点不接地系统,其单相接地故障时的零序网络如图 1 所示。开关 K 打开,系统为不接地系统,开关 K 闭合,系统为经消弧线圈接地系统。根据线路零序电流、电压关系,对图 1 中任意一条健全线路(以健全线路 l 为例),可以建立如下方程

$$u_0 = R_0 \left(i_0 - C_{01} \frac{du_0}{dt} \right) + L_0 \frac{d}{dt} \left(i_0 - C_{01} \frac{du_0}{dt} \right) + \frac{1}{C_{02}} \int_0^t \left(i_0 - C_{01} \frac{du_0}{dt} \right) dt \quad (1)$$

式中: R_0 、 L_0 、 C_{01} 、 C_{02} 分别为该线路的零序电阻、零



u_{f0} 为故障点虚拟电源在零序网络上的压降; R_{0p} 、 L_{0p} 、 C_{0p1} 和 C_{0p2} 分别为线路 p 的零序电阻、零序电感和母线侧及负荷侧零序电容; L 为消弧线圈零序电感。

图 1 单相接地故障零序网络

序电感和母线侧及负荷侧零序电容; u_0 、 i_0 分别表示保护安装处实时测得的母线零序电压和流过线路的零序电流。

对式(1)两侧积分两次,可得

$$\int_0^t \left(\int_0^t u_0 dt \right) dt = R_0 \left(\int_0^t \left(\int_0^t i_0 dt \right) dt - C_1 \int_0^t u_0 dt \right) + L_0 \left(\int_0^t i_0 dt - C_1 u_0 \right) + \frac{1}{C_2} \left(\int_0^t \left(\int_0^t \left(\int_0^t i_0 dt \right) dt \right) dt - C_1 \int_0^t \left(\int_0^t u_0 dt \right) dt \right) \quad (2)$$

这是个时域的方程,将积分用复化梯形积分公式代替,即令

$$i_0 = i(k); u_0 = u(k) \quad (3)$$

$$u^1(k) = \int_0^t u_0 dt =$$

$$T \left[\frac{1}{2} (u(0) + u(k)) + \sum_{m=1}^{k-1} u(m) \right] \quad (4)$$

$$u^2(k) = \int_0^t \left(\int_0^t u_0 dt \right) dt =$$

$$T \left[\frac{1}{2} (u^1(0) + u^1(k)) + \sum_{m=1}^{k-1} u^1(m) \right] \quad (5)$$

$$i^1(k) = \int_0^t i_0 dt = T \left[\frac{1}{2} (i(0) + i(k)) + \sum_{m=1}^{k-1} i(m) \right] \quad (6)$$

$$i^2(k) = \int_0^t \left(\int_0^t i_0 dt \right) dt =$$

$$T \left[\frac{1}{2} (i^1(0) + i^1(k)) + \sum_{m=1}^{k-1} i^1(m) \right] \quad (7)$$

$$i^3(k) = \int_0^t \left(\int_0^t \left(\int_0^t i_0 dt \right) dt \right) dt =$$

$$T \left[\frac{1}{2} (i^2(0) + i^2(k)) + \sum_{m=1}^{k-1} i^2(m) \right] \quad (8)$$

式中: $u(k)$ 、 $i(k)$ 分别为故障发生后第 k 个采样点的零序电压和零序电流; T 表示采样间隔; $u^1(k)$ 、 $u^2(k)$ 分别表示零序电压从初始时刻到第 k 个采样点的一次积分和二次积分; $i^1(k)$ 、 $i^2(k)$ 、 $i^3(k)$ 分别表示零序电流从初始时刻到第 k 个采样点的一次积分、二次积分和三次积分。

将式(3)~式(8)代入式(2),可得

$$u^2(k) = R_0 (i^2(k) - C_1 u^1(k)) + L_0 (i^1(k) - C_1 u(k)) + \frac{1}{C_2} (i^3(k) - C_1 u^2(k)) \quad (9)$$

至此,我们就建立起了小电流接地系统发生单相接地故障时,某条健全线路的模型。同理,我们可以对系统每条线路按此方法建立模型。

对于中性点经消弧线圈接地系统(即图 1 中开

关K闭合)接入后,健全线路零序网络模型并没有改变,其零序电流电压对应关系亦没有改变,所以图1所示的健全线路的故障模型也完全适合中性点经消弧线圈接地系统。

2 模型识别

2.1 最小二乘参数估计

模型中线路母线侧的对地电容为已知量,式(9)实际未知量为线路参数 R_0 、 L_0 和 C_2 ,可以表示为 $f(R_0, L_0, C_2) = 0$ 的线性方程,连续取4个采样点数据,联立就可得到一个方程组,求解方程组即可得到待求 C_2 。为得到更为精确稳定的解,使用最小二乘近似的原理进行求解。令

$$a_1 = R_0; a_2 = L_0; a_3 = 1/C_2$$

$$y(k) = u^2(k); g_1(k) = i^2(k) - C_1 u^1(k)$$

$$g_2(k) = i^1(k) - C_1 u(k); g_3(k) = i^3(k) - C_1 u^2(k)$$

将以上各式代入式(9),得

$$g_1 a_1 + g_2 a_2 + g_3 a_3 = \sum_{l=1}^3 g_l d_l = y \quad (10)$$

根据最小二乘原理,要寻求合适 a_l

$$\min E^2 = \min \sum_{k=1}^m \left[\sum_{l=1}^3 a_l g_l(k) - y(k) \right]^2 \quad (11)$$

式中: m 为参数估计所使用的数据点个数。显然式(11)为 a_l 的二次函数,该式成立的条件是

$$\partial E^2 / \partial a_l = 0 \quad l = 1, 2, 3 \quad (12)$$

于是可得

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} b_l &= \sum_{k=1}^m y_k g_l(k) \quad l = 1, 2, 3 \\ a_{lj} &= \sum_{k=1}^m g_j(k) g_l(k) \quad l, j = 1, 2, 3 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

取连续采样点求解式(13),即可得到最小二乘意义下的参数估计值。

从式(13)可以看出,待估参数有3个,采取数据冗余的方式,用一段时间的采样值对参数做出一个估计值,然后推移数据窗,用另外一组数据又可以估计出一个参数值,如此重复即可求解出待估参数的一个序列,供选线使用。使用最小二乘参数估计可以使模型特征能够得到更加充分的体现,减小了采样误差和数据计算误差等给参数估计带来的波动性。

2.2 模型的适用频带

在建立故障模型时,我们把线路等效为 Π 模

型,这是对实际线路的精确分布参数模型的一种近似,两者的幅频、相频特性并不完全一致,对于一定频率以上的高次谐波,使用 Π 模型误差较大,会造成模型的精确度下降,影响选线灵敏度。所以,有必要找出模型的适用频带,滤除原始数据中的高频分量。不同长度的线路截止频率 ω_0 可以参考表1。

表1 不同长度线路截止频率

线路长/km	<10	10~20	20~30	30~40	>40
截止频率/Hz	2 500	1 500	1 000	700	500

2.3 选线判据

通过以上分析,利用最小二乘近似法可以得到所建模型的3个待估参数,根据这些参数的特征,就可以进行线路故障的模型识别。理论上来说,如果实际发生的故障符合所建模型,所得参数应该和实际线路参数相同,且不应随时间变化。如果是本线路内部发生故障,则此时求解出的应该是把该线路背侧系统等效成 Π 模型,母线侧为该线路对地电容的一半,其负荷侧对地电容的负值(电流互感器极性为反)。实际上,线路背侧阻抗是多条线路及其他元件并联而成,含有多个储能元件,每个储能元件都有其不同的状态初值下的暂态过程,并不能等效成一个这样简单的 Π 模型。所以,此时所得计算结果应与实际线路参数差别很大,很可能是负值或随时间变化剧烈。实际考虑到计算误差、采样误差等因素,所得结果与预期值有一定差距,所以在实现选线时要考虑这种情况,判据留出裕量。

根据模型参数识别法原理,不符合模型的线路选为故障线,符合模型的线路为健全线,如果所有线路均选为健全线,则认为是母线故障。具体可按照下面的选线判据选出故障线路。

(1)若线路计算电容参数平均值为负,即

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C(k) < 0$$

式中: $C(k)$ 是计算所得电容参数序列。

(2)若线路计算电容平均值为正,但计算值变化剧烈,则认为所发生故障不符合所建立模型,判为本线故障, σ 为误差限,即

$$\bar{C} > 0; \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m |C(k) - \bar{C}| / |\bar{C}| > \sigma \quad (15)$$

(3)若以上条件不满足,判本线为健全线路。

(4)根据所建模型,当线路为健全线路时应有 $C_1 < C_2$ 成立,若不成立,则可作为判别故障线路的辅助判据。

(5)当所有线路判为健全线时,认为母线故障。

由于故障线路的电容参数变化的剧烈程度与具体的故障情况及数据精度有关,门槛值的整定有一定困难。现阶段根据大量故障仿真结果, σ 保守取50%可以满足选线要求,今后可以根据现场实际运行经验数据取更为合适的数值。

3 故障仿真和现场录波数据验证

3.1 EMTP 仿真数据验证

仿真系统见图2,开关K断开为不接地,开关K闭合时,系统经消弧线圈接地,过补偿度为8%。

线路参数 $r_0=0.23 \Omega/\text{km}$, $L_0=1.72 \times 10^{-3} \text{ H/km}$, $c_0=6 \times 10^{-9} \text{ F/km}$, $r_1=0.17 \Omega/\text{km}$, $L_1=0.38 \times 10^{-3} \text{ H/km}$, $c_1=9.69 \times 10^{-9} \text{ F/km}$ 。各线路长度如图2所示。负荷变压器、负荷开关后线路等元件的对地电容仿真中用线路对地电容一半代替。仿真中负荷利用一个等效阻抗($400+j20 \Omega$)代替。采样频率为10 kHz,采样个数到故障后一个工频周期。

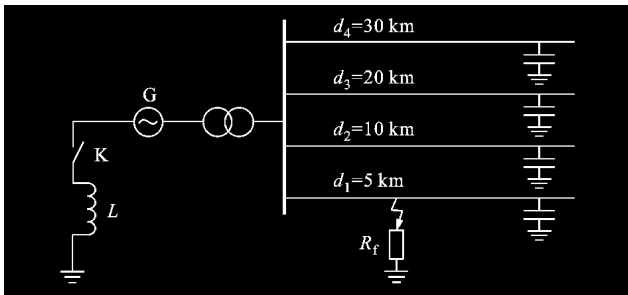


图2 仿真系统示意图

表2为EMTP仿真结果,其中偏差计算公式为

$$\eta = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m |C(k) - \bar{C}| / |\bar{C}| \times 100\%$$

仿真结果从数据上说明了无论是中性点不接地或经消弧线圈接地,还是金属性故障或者高阻接地,故障线和健全线区别度都很大,这保证选线的可靠性和准确性。

3.2 积分算法和微分算法的比较

线路1首段故障,故障初相角为 90° 。电压、电流经过不同截止频率的低通滤波器滤波,分别用积分算法和微分算法计算方程系数,识别健全线路4和故障线路1的参数,结果见表3。

从表3可以看出,当电压、电流信号中含有不符合模型的高频分量时,使用微分方法计算方程系数识别出的健全线参数误差很大,故障线参数波动也较大。使用积分方法计算方程系数,无论健全线或者故障线识别出的参数序列都很稳定,识别出的健全线的参数更加准确,这就提高了选线的灵敏度和可靠性。

3.3 现场录波数据验证

银川市新城变10 kV I、II段接地方式为中性点经自动调谐消弧线圈接地,每条母线出线总数在9条以上,大多数出线为纯电缆线路,其余为电缆架空线混合线路,单端母线接地电流在50 A以上。新城变选线装置记录多次单相接地故障,其中一次单相永久性故障的零序电压如图3所示,对此次故障使用该方法得到的模型参数结果波形如图4所示。

由图4可以看出,实际识别出的健全线路(符合

表2 EMTP 仿真结果

线 路	中性点不接地系统						经消弧线圈接地					
	$R_f=0 \Omega$			$R_f=500 \Omega$			$R_f=0 \Omega$			$R_f=500 \Omega$		
	$\bar{C}/\mu\text{F}$	$\eta/\%$	选线结果	$\bar{C}/\mu\text{F}$	$\eta/\%$	选线结果	$\bar{C}/\mu\text{F}$	$\eta/\%$	选线结果	$\bar{C}/\mu\text{F}$	$\eta/\%$	选线结果
1	-0.650 6	0.087 6	线路1	-0.649 0	0.026 8	线路1	-1.916 6	50.381 3	线路1	-1.600 8	41.259 6	线路1
2	0.072 3	0.532 3		0.071 2	0.195 9		0.072 3	0.532 8		0.071 4	0.293 9	
3	0.141 1	0.117 0		0.140 5	0.046 0		0.141 1	0.117 1		0.140 6	0.066 7	
4	0.209 9	0.028 7		0.209 8	0.015 8		0.209 9	0.028 7		0.209 8	0.022 0	

表3 积分、微分算法比较的仿真结果

截止 频率 /kHz	积分算法						微分算法					
	健全线			故障线			健全线			故障线		
	$\bar{C}/\mu\text{F}$	$\eta/\%$	误差/%	$\bar{C}/\mu\text{F}$	$\eta/\%$		$\bar{C}/\mu\text{F}$	$\eta/\%$	误差/%	$\bar{C}/\mu\text{F}$	$\eta/\%$	
5	0.210 3	0.082 9	0.139 7	-1.545 1	38.858 5		3.449 3	8.612 7	1 542.5	-2.942 4	10.279 6	
3	0.210 3	0.082 2	0.138 3	-1.545 2	38.861 7		2.156 8	8.277 3	927.059 9	-3.159 4	12.512 8	
1	0.210 3	0.081 1	0.135 3	-1.562 4	39.490 1		0.253 5	0.155 4	20.719 9	-1.511 7	9.152 2	
0.5	0.209 9	0.028 7	-0.043 2	-1.916 6	50.381 3		0.212 6	0.153 4	1.233 1	-0.765 6	3.678 1	

注:截止频率为低通滤波器上电压、电流信号的上限截止频率。

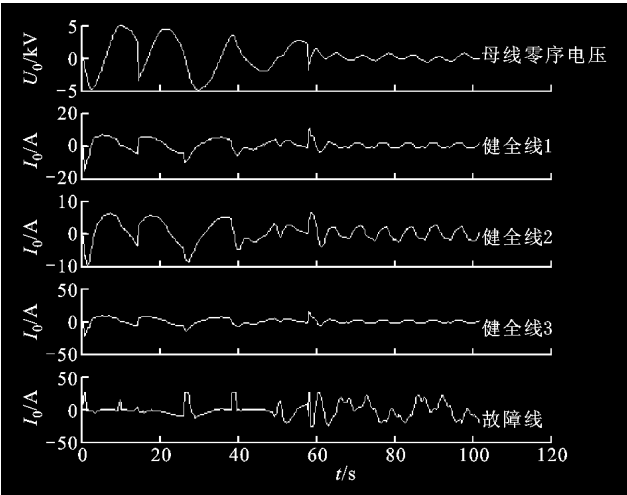


图3 现场录波故障数据的零序电压和零序电流波形

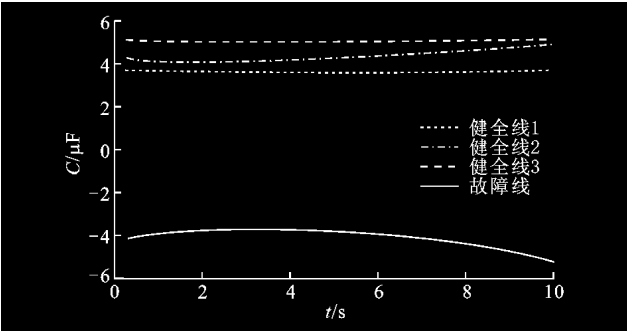


图4 现场录波数据的健全线和故障线计算电容波形对比

模型)的电容值并不是一条直线,而是在实际参数附近小幅波动的一条曲线,而故障线路(不符合模型)的电容值一直稳定为负,二者区别明显,选线可靠。

现场录波数据的选线结果见表 4,由于出线较多,表 4 只列出故障线和部分健全线的结果。

表 4 现场录波数据分析结果

故障序号	线路名	$\bar{C}/\mu\text{F}$	$\eta/\%$	选线结果
故障 1 (线路故障)	故障线	-5.48	24.69	故障线
	健全线 1	3.56	0.54	
	健全线 2	4.81	10.63	
	健全线 3	5.11	2.17	
故障 2 (线路故障)	故障线	-15.67	38.24	故障线
	健全线 1	4.73	2.77	
	健全线 2	4.21	1.75	
	健全线 3	6.24	2.69	
故障 3 (线路故障)	故障线	-17.20	24.69	故障线
	健全线 1	3.18	1.55	
	健全线 2	5.62	0.91	
	健全线 3	3.64	1.41	
故障 4 (母线故障)	健全线 1	0.76	5.71	母线
	健全线 2	1.83	1.38	
	健全线 3	3.41	0.54	
	健全线 4	4.72	2.48	

4 结 论

文中提出一种在系统线路参数已知时,基于模型参数识别的小电流接地迭代的新方法,该迭代方法具有以下特点:

- (1)把 Π 模型母线侧对地电容作为已知量,建立的线路模型更加接近实际,所建模型的数学方程为线性方程,使得求解参数简单易行;
- (2)利用积分计算待求方程系数,可降低不符合模型的高频分量的影响,降低对低通滤波器性能的要求,保证参数识别的准确度;
- (3)本文方法在实际应用中可以和文献[4]的方法相互配合,在未知线路参数时采用文献[4]中的选线方法,在已知线路参数时采用本文方法,可以保证更高的选线灵敏度和可靠性。

参考文献:

[1] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京:中国电力出版社,2001.

[2] LEHTONEN M, HAKOLA T. Neutral earthing and power system protection [M]. Vaasa, Finland: ABB Transmit Oy Publication,1996.

[3] 贾清泉,刘连光,杨以涵,等. 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护 [J]. 中国电机工程学报,2001,21(10):78-82.
JIA Qingquan, LIU Lianguang, YANG Yihan, et al. Abrupt change detection with wavelet for small current fault relaying [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (10):78-82.

[4] 薛永端,徐丙垠,冯祖仁,等. 小电流接地故障暂态方向保护原理研究 [J]. 中国电机工程学报,2003,23(7): 51-56.
XUE Yongduan, XU Bingyin, FENG Zuren, et al. The principle of directional earth fault protection using zero sequence transients in non-solid earthed network [J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(7):51-56.

[5] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地 [M]. 北京:中国电力出版社,2000.

[6] 索南加乐,张超,王树刚. 基于模型参数识别法的小电流接地选线研究 [J]. 电力系统自动化,2004,28(19): 65-70.
SUONAN Jiale,ZHANG Chao,WANG Shugang. Fault line selection in the non-solid earthed network based on the model identification method [J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(19):65-70.

(编辑 杜秀杰)