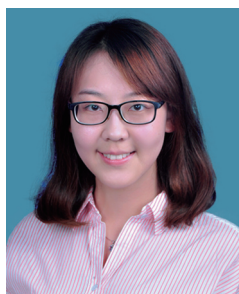


零序电压轨迹在船舶中压电力系统中的应用

船舶中压电力系统一般采用发电机中性点高阻接地方式。由于电力电缆的大量使用，电网的分布电容较大，若分布电容不平衡，会使零序电压发生偏移，从而对某些依据零序电压变化的选线方法灵敏度和可靠性产生影响。详细分析了船舶中压电力系统分布电容不平衡时零序电压随绝缘电阻变化的特征，提出了基于零序电压轨迹法的绝缘故障选相方法，仿真结果证明了该方法的有效性和实用性。

韩 瑞 陈 亮 李 耕 张晓锋/海军工程大学电气工程学院



韩 瑞/硕士研究生

船舶中压电力系统一般采用发电机中性点高阻接地方式。利用船舶电网发生单相接地故障或低绝缘电阻故障后出现零序电压漂移这一特点，可以监视电网的绝缘状态。因为系统对称时，在无故障情况下零序电压几乎为零，但在实际系统中可能出现电网分布电容不平衡的状况。同样的，不平衡的分布电容也会引起零序电压的漂移，这将影响绝缘故障监测的灵敏度和可靠性。

目前，专门针对船舶中压高阻接地系统发生绝缘故障时零序电压变化轨迹的研究较少。文献[1-3]分析了小电流接地系统发生单相接地故障后的稳态及暂态变化过程，但是均建立在系统参数严格对称的基础上，并未考虑系统分布电容不平衡对零序电压的影响。文献[4-5]中也介绍了一些基于零序分量的故障选相方法，如零序电流群体比幅比相法、零序电流方向法等，这些方法应用于船舶电力系统时同样存在着一些不足，比如不易发现经高过渡电阻的接地故障（即绝缘故障）情况。文献[6-7]介绍了陆地相同电压等级的配电网大多采用

谐振接地方式，与高阻接地系统零序电压的变化特征也不尽相同。因此，本文详细分析了船舶中压高阻接地系统分布电容不平衡时零序电压随绝缘电阻变化的特征，提出了基于零序电压轨迹的绝缘故障选相方法，并利用Matlab搭建了系统模型，同时对该方法进行了仿真验证，仿真结果表明该方法可有效解决分布电容不平衡电网的绝缘故障选相问题，为故障类型的识别提供了理论依据。

零序电压特性分析

单相绝缘故障与电容不平衡都能造成系统中性点电位的偏移，引起系统零序电压增大。三相电压出现不对称，表现形式十分相似。下面将详细分析单相绝缘故障与单相电容不平衡时零序电压的变化特征及不同情况下零序电压的变化趋势。本文所述零序电压均为中性点接地电阻零序电压，即严格意义上为零序电压值的3倍。中性点经高阻接地系统单相接地故障等效模型如图1所示。

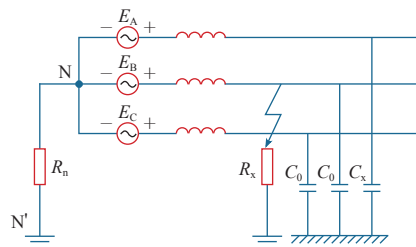


图1 中性点经高阻接地系统故障等效模型

图1为B相接地故障，其中，接地过渡电阻为 R_x ；中性点电阻为 R_n ；系统正常单相总电容为 C_0 ；电容不平衡相电容值为 C_x ，且 $C_x = kC_0$ ， k 为某相分布电容

关键词/Keywords

船舶中压电力系统 ·
零序电压轨迹 ·
分布电容不平衡 ·
单相绝缘故障 ·

与其他相分布电容的不平衡系数, 本文讨论 k 的范围为 $[0, 2]$, 对于中压电力系统, 所涉及的三相元件仅有发电机、变压器和电缆线路等。电力系统在正常运行方式下, 若对地分布电容存在不平衡, 将导致系统出现不平衡零序电压。通常发电机、变压器等设备具有良好的对称性, 因此对地分布电容的平衡度主要取决于电缆线路的平衡度。

以图1系统为例, 由基尔霍夫电流定律可得

$$\frac{U_{NN'}}{R_n} + (U_A + U_{NN'})j\omega C_a + (U_B + U_{NN'})j\omega C_b + (U_C + U_{NN'})j\omega C_c + I_{LA} + I_{LB} + I_{LC} = 0 \quad (1)$$

式中, $U_{NN'}$ 为中性点对地电压相量, 即基波零序电压; U_A 、 U_B 和 U_C 为三相相电压; I_{LA} 、 I_{LB} 和 I_{LC} 为几种等效负载的三相电流, 且不接地三相负载的三相电流 $I_{LA} + I_{LB} + I_{LC} = 0$ 。

(1) 单相绝缘故障

令 $C_x = C_0$, 系统经B相过渡电阻 R_x 单相接地, 则零序电压表达式为

$$U_{NN'R} = -\frac{U_B}{1 + \frac{R_x}{R_n} + j\omega 3C_0 R_x} \quad (2)$$

由式(2)可知, 零序电压的反电压 $U_{N'N}$ 与故障相电压夹角为

$$\gamma_R = \arctan\left(\frac{R_x}{R_x + R_n} - 3\omega C_0 R_n\right) \quad (3)$$

(2) 单相电容不平衡

仍以图1为例, 令 $R_x = \infty$, A相电容不平衡, 则零序电压表达式为

$$U_{NN'C} = -\frac{j\omega(C_x - C_0)R_n}{1 + j\omega(2C_0 + C_x)R_n} U_A \quad (4)$$

由式(4)可知, 零序电压的反电压 $U_{N'N}$ 与不平衡相电压夹角为

$$\gamma_C = \arctan\left(\frac{1}{3\omega C_0 R_n + \omega(C_x - C_0)R_n}\right) \quad (5)$$

由式(2)、式(4)可知, γ_R 与 γ_C 均小于 90° 。

(3) 单相电容不平衡与单相绝缘故障同时存在

根据图1所示的高阻接地模型推导故障零序电压公式, 分别对应电容不平衡与绝缘故障同相、电容不平衡相超前绝缘故障相 120° 以及电容不平衡

相滞后绝缘故障相 120° 这三种情况。

1) 当系统A相同时出现单相绝缘故障和单相电容不平衡时, 零序电压表达式为

$$\begin{aligned} U_{NN'1} &= -\frac{1 + j\omega(C_x - C_0)R_x}{1 + \frac{R_x}{R_n} + j\omega(C_x + 2C_0)R_x} U_A \\ &= -\frac{1 + j\omega(k-1)C_0 R_x}{1 + \frac{R_x}{R_n} + j\omega(k+2)C_0 R_x} U_A \end{aligned} \quad (6)$$

则零序电压的反电压 $U_{N'N}$ 与故障相的夹角为

$$\gamma_{\Sigma 1} = \arctan \frac{\omega R_x \left[\left(1 + \frac{R_x}{R_n} \right) (k-1)C_0 - (k+2)C_0 \right]}{1 + \frac{R_x}{R_n} + \omega^2 R_x^2 (k-1)(k+2)C_0^2} \quad (7)$$

2) 当系统电容不平衡超前单相绝缘故障相 120° 时(以A相故障、C相不平衡为例), 零序电压表达式为

$$\begin{aligned} U_{NN'2} &= \frac{1/2 - j[\omega(C_x - C_0)R_x - \sqrt{3}/2]}{1 + \frac{R_x}{R_n} + j\omega(C_x + 2C_0)R_x} U_A \\ &= \frac{1/2 - j[\omega(k-1)C_0 R_x - \sqrt{3}/2]}{1 + \frac{R_x}{R_n} + j\omega(k+2)C_0 R_x} U_A \end{aligned} \quad (8)$$

则零序电压的反电压 $U_{N'N}$ 与故障相的夹角为

$$\gamma_{\Sigma 2} = \arctan \frac{-\left(1 + \frac{R_x}{R_n}\right)\left[\omega(k-1)C_0 R_x - \frac{\sqrt{3}}{2}\right] - \frac{1}{2}\omega(k+2)C_0 R_x}{\frac{1}{2}\left(1 + \frac{R_x}{R_n}\right) - \omega^2 R_x^2 (k-1)(k+2)C_0^2 + \frac{\sqrt{3}}{2}\omega(k+2)C_0 R_x} \quad (9)$$

3) 当系统电容不平衡相滞后绝缘故障相 120° 时(以A相故障、B相不平衡为例), 零序电压表达式为

$$\begin{aligned} U_{NN'3} &= \frac{1/2 - j[\omega(C_x - C_0)R_x + \sqrt{3}/2]}{1 + \frac{R_x}{R_n} + j\omega(C_x + 2C_0)R_x} U_A \\ &= \frac{1/2 - j[\omega(k-1)C_0 R_x + \sqrt{3}/2]}{1 + \frac{R_x}{R_n} + j\omega(k+2)C_0 R_x} U_A \end{aligned} \quad (10)$$

则零序电压的反电压 $U_{N'N}$ 与故障相的夹角为

$$\gamma_{\Sigma 3} = \arctan \frac{-\left(1 + \frac{R_x}{R_n}\right) \left[\omega(k-1)C_0R_x + \frac{\sqrt{3}}{2} \right] - \frac{1}{2} \omega(k+2)C_0R_x}{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{R_x}{R_n}\right) - \omega^2 R_x^2 (k-1)(k+2)C_0^2 - \frac{\sqrt{3}}{2} \omega(k+2)C_0R_x} \quad (11)$$

零序电压变化轨迹图

假设某船系统分布电容数据如表1所示。

表1 某船舶中压电力系统参数

单位数量/长度设备	单相对地电容值	数量	总单相对地电容值
发电机定子绕组	0.2 μF	2台	0.4 μF
变压器	0.03 μF	6台	0.18 μF
电缆	0.477 $\mu\text{F}/\text{km}$	5 km	2.385 μF

该船发电机输出额定电压6 600 V，单台发电机中性点接地电阻值为530 Ω ，两台发电机并联时中性点接地电阻值为265 Ω ，合计两台发电机并联运行时系统单相对地总电容 $C_0 = 3.965 \mu\text{F}$ 。

根据式(6)~式(11)的推导，即可作出零序电压在这三种故障情况时的变化轨迹。由于篇幅有限，只列出 $k = 0.5$ 时A相发生绝缘故障的部分计算数据，各种情况下零序电压幅值相位计算结果如表2~表5所示。其中， $C_0 = 3.965 \mu\text{F}$ ， $C_x = kC_0 = 0.5 \times 3.965 \mu\text{F} = 1.982 5 \mu\text{F}$ 。

表2 不平衡相与接地故障相同相时计算结果

R_x	零序电压幅值/V	零序电压相位($^\circ$)
0	5 389.00	180.00
100	3 823.63	163.70
300	2 355.15	145.75
500	1 720.84	134.36
700	1 385.19	125.53
900	1 184.95	118.20
1 000	1 113.91	114.96
5 000	698.27	69.71
10 000	683.96	60.32
30 000	683.40	53.78
50 000	684.21	52.45

该船在两台发电机并联供电情况下，零序电压随不平衡度 k 和不同接地故障电阻 R_x 变化的轨迹如图2~图5所示。

图2~图4中所标注的 k 值为电容不平衡系数，

表3 不平衡相超前接地故障相 120° 时计算结果

R_x	零序电压幅值/V	零序电压相位($^\circ$)
0	5 389.00	60.00
100	4 023.83	48.95
300	2 698.38	40.94
500	2 101.75	38.65
700	1 770.94	38.09
900	1 562.50	38.17
1 000	1 484.99	38.32
5 000	856.40	44.75
10 000	771.12	47.17
30 000	714.28	49.25
50 000	702.96	49.72

表4 不平衡相滞后接地故障相时计算结果

R_x	零序电压幅值/V	零序电压相位($^\circ$)
0	5 389.00	-60.00
100	3 612.35	-70.85
300	1 952.49	-77.30
500	1 226.88	-76.31
700	837.41	-71.60
900	605.65	-63.94
1 000	525.72	-59.06
5 000	491.67	39.37
10 000	583.93	45.88
30 000	651.04	49.11
50 000	664.93	49.67

表5 系统平衡时发生单相绝缘故障计算结果

R_x	零序电压幅值/V	零序电压相位($^\circ$)
0	5 389.00	180.00
100	3 776.05	195.18
300	2 237.17	207.74
500	1 567.16	212.91
700	1 201.92	215.69
900	973.59	217.42
1 000	888.93	218.06
5 000	197.59	223.24
10 000	100.12	223.97
30 000	33.67	224.47
50 000	20.24	224.57

图中所示分别为 $C_x = 2C_0$ 、 $C_x = 1.5C_0$ 和 $C_x = 0.5C_0$ 时的情况。图5所示为 $C_x = C_0$ ，即分布电容平衡时发生不完全接地故障的情况。该极坐标图的曲线上

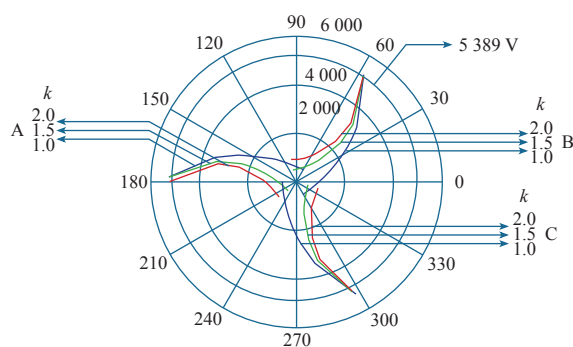


图2 电容不平衡与故障同相时零序电压轨迹

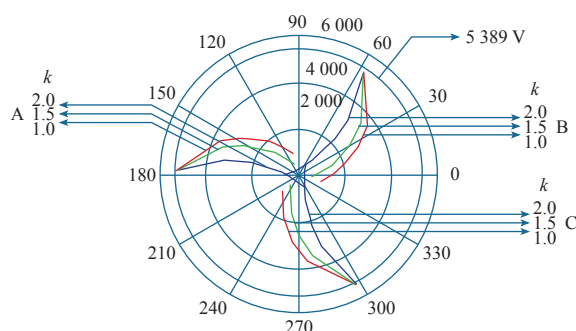


图3 电容不平衡超前故障相120°时零序电压轨迹

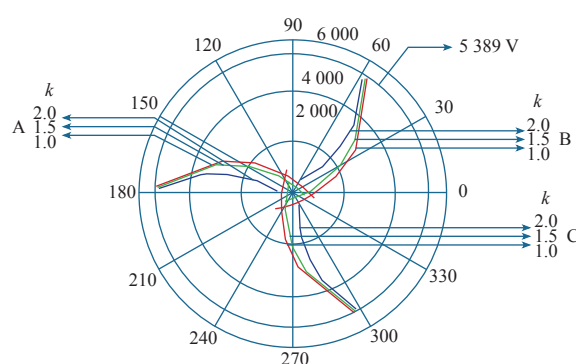


图4 电容不平衡滞后故障相120°时零序电压轨迹

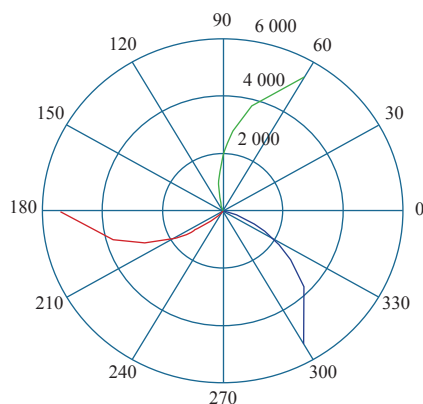


图5 三相分布电容平衡时零序电压轨迹

某一点，半径为零序电压幅值，逆时针方向的角度为零序电压相位。由图2～图5可得出如下结论：

1) 当综合考虑绝缘故障与电容不平衡影响时，接地过渡电阻小于1 k Ω ，无论系数 k 如何变化，轨迹的走向和落点总是在故障相相反方向的扇区内。表明此时接地过渡电阻对中性点电位偏移的作用更大。

2) 当接地过渡电阻值很高时，电容不平衡对中性点电压偏移作用明显，相同不平衡相的起始点总是落在同一“8”字扇区内。

3) 随着接地过渡电阻逐渐减小，零序电压幅值逐步接近电源相电压5 389 V，其轨迹方向逐步趋近于A、B和C相的反方向（见图2～图4中A、B和C标注）。若系统总分布电容三相平衡，当A、B和C相分别发生金属性接地故障时，零序电压的相角分别达到180°、60°和300°，幅值等于相电压。

4) 图2～图4中A、B和C相发生绝缘故障的轨迹曲线分别对应电容不平衡与绝缘故障同相、电容不平衡超前绝缘故障相120°以及电容不平衡滞后绝缘故障相120°这三种情况。

5) 当分布电容平衡时，零序电压起始点由原点出发（见图5）。

基于零序电压轨迹的绝缘故障选相方法

根据上述分析可知，零序电压的变化趋势表征了故障类型，因此可由下述方法判断：首先在未发生单相接地故障时，由中性点持续监测零序电压，根据零序电压的幅值和相位偏移情况即可判断系统分布电容是否平衡，若不平衡是哪一项不平衡，再根据零序电压的变化轨迹及趋势判断出接地故障相。由上述分析可知，通过持续监测零序电压的变化轨迹，即可判断出故障类型。

以船舶参数两台发电机并联运行为例，通过归纳图2～图5的规律以及式(6)～式(11)的推导，得到该船的故障类型判别表，如表6所示。

仿真验证

针对船舶中压电力系统搭建Matlab仿真模型，

表6 故障类型判别表

故障类型	轨迹趋势	趋近于180°	趋近于300°	趋近于60°
30°~60°、210°~240°	A相绝缘故障	B相绝缘故障	C相绝缘故障	
150°~180°、330°~360°	A相电容不平衡	A相电容不平衡	A相电容不平衡	
90°~120°、270°~300°	B相绝缘故障	B相绝缘故障	B相绝缘故障	
	B相电容不平衡	B相电容不平衡	B相电容不平衡	
	C相绝缘故障	C相绝缘故障	C相绝缘故障	
	C相电容不平衡	C相电容不平衡	C相电容不平衡	

如图6所示。在具有单相不平衡的前提下，通过设定系统各项参数模拟发生单相接地故障时零序电压幅值、相角的变化，记录数据并绘制零序电压轨迹，如图7所示。

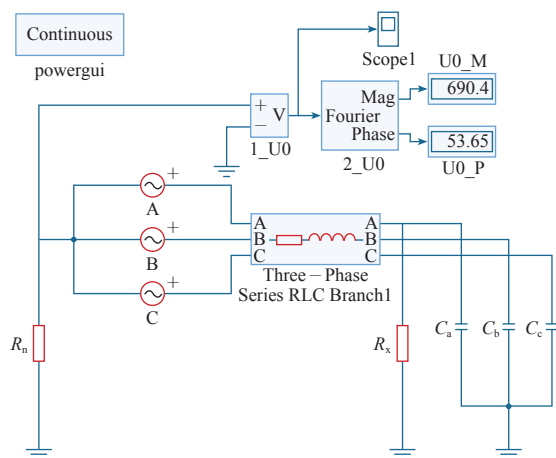


图6 船舶中压电力系统Matlab仿真模型

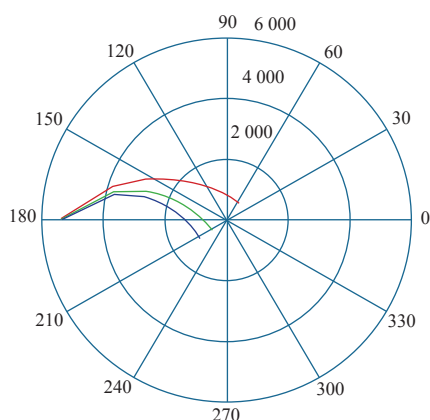


图7 零序电压轨迹

当该模型设置系统存在A相分布电容不平衡，

表7 不平衡相与绝缘故障相同相时仿真结果

R_x	$k=0.5$		$k=1.5$		$k=2$	
	零序电压幅值/V	零序电压相位/°	零序电压幅值/V	零序电压相位/°	零序电压幅值/V	零序电压相位/°
0	5 506	178.3	5506	178.3	5 505	178.3
100	3 880	162.5	3795	164.9	3 765	166.0
300	2 381	144.9	2219	158.1	2 239	164.5
500	1 739	133.8	1580	159.4	1 689	170.5
700	1 398	125.0	1253	162.9	1 438	176.6
900	1 198	117.6	1062	166.9	1 308	182.0
1 000	1 124	114.3	995	169.1	1 267	184.5
5 000	705	69.3	606	204.1	1 084	208.9
10 000	690	60.1	591	212.0	1 085	212.9
30 000	690	53.5	589	217.7	1 089	215.5
50 000	691	52.1	590	219.0	1 090	216.0

且不平衡度分别为 $k=0.5$ 、1.5和2时，所设故障为A相绝缘故障。由仿真模型测得零序电压的相位幅值如表7所示。由图7的零序电压轨迹可见，该轨迹的变化趋势随着故障情况的劣化而变化，即过渡电阻逐渐减小，零序电压的相位逐步趋近于180°，处于与A相反相的相位扇区内，因此该模型设置的故障为A相绝缘故障。当A相发生金属性接地故障时，幅值等于相电压，这与理论分析一致。考虑到轨迹的起始点电阻值偏大，此时电容不平衡对中性点电位的偏移起主要作用。因此，可以通过曲线起始点所在的区域来判别电容不平衡相。起始扇区的范围即根据上文中推导的式(7)、式(9)和式(11)算得零序电压相位区域，该轨迹起始时刻零序电压的相位均位于30°~60°、210°~240°范围内，因此可判断出该模型系统存在A相分布电容不平衡现象。故该仿真模拟的故障类型为A相电容不平衡时发生A相绝缘故障，与仿真模型中设置的故障一致，验证了该零序电压轨迹法的正确性。

结束语

本文详细分析了中性点高阻接地系统零序电压随单相接地故障过渡电阻和分布电容不平衡度变化的幅值及相位特征，为故障类型的判断提供了理论基础。

(下转第40页)

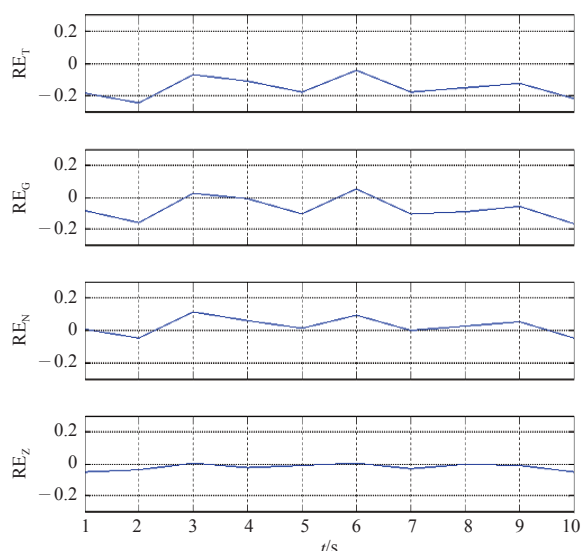


图3 3种预测方法及组合预测误差对比
功率预测中。

参考文献

- [1] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用 [J]. 中国安全科学学报, 2008, 18 (5): 148-153.
- [2] 陈锦涛, 李杰夫. 基于层次分析法的电力负荷组

(上接第31页)

1) 当船舶电力系统工况确定后, 根据电网电力参数可以建立相应的零序电压轨迹图。

2) 零序电压轨迹法可以用来判别不同故障类型, 利用零序电压轨迹图的起始扇区判别系统分布电容不平衡相, 同时利用轨迹的趋势和落点判别单相接地故障相, 若其符合某一轨迹曲线特征, 还可以判别某相绝缘劣化即经过渡电阻接地故障的情况。

3) 零序电压轨迹的起始扇区需在系统正常运行时确定, 即系统未发生故障、绝缘电阻值很大时, 此时认为系统仅存在电容引起的较小不平衡电压。

参考文献

- [1] 张慧芬, 潘贞存, 田质广, 等. 一种中低压配电网单相接地故障选线新方法 [J]. 电网技术, 2005, 29 (3): 76-80.

合预测 [J]. 现代计算机, 2013, 10 (28): 31-34.

- [3] 吴丹, 程浩忠, 奚珣. 基于模糊层次分析法的电力负荷组合预测 [J]. 华东电力, 2006, 34 (4): 10-13.
- [4] 刘赛, 陈光东. 层次分析法在电力负荷组合预测中的应用 [J]. 长沙电力学院学报: 自然科学版, 2002, 17 (4): 41-43.
- [5] 赵云飞. 层次分析法在电力负荷预测中的应用研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [6] Chow T W S, Leung C T. Neural network based short-term load forecasting using weather compensation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11 (4): 1736-1742.
- [7] Ji Aibing, Qiao Yanhua, Qiu Hongjie. Combination forecasting of fuzzy forecast [J]. Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2009, 3 (1): 262-266.
- [8] 耿光飞, 郭喜庆. 模糊线性回归法在负荷预测中的应用 [J]. 电网技术, 2002, 26 (4): 19-21.

(收稿日期: 2015-10-08) **EA**

- [2] 王兴国, 黄少锋. 过渡电阻对故障暂态分量的影响分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (2): 18-21.
- [3] 陈禹任, 查建平, 高源, 等. 小电流接地系统单相接地故障分析 [J]. 中国电力教育, 2014 (15): 255-257.
- [4] 王勇. 船舶交流电力系统绝缘监测系统研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [5] 郭清滔, 吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (2): 146-152.
- [6] 李晓波, 刘宝稳, 王崇林. 谐振接地系统零序电压轨迹及准确控制方法 [J]. 电网技术, 2013, 37 (9): 2669-2674.
- [7] 王玘, 何正友, 张姝. 基于零序电荷-电压关系的谐振接地系统单相接地故障特征分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (11): 18-24.

(收稿日期: 2015-02-10) **EA**