

零序电流增量故障定位法的影响因素分析

针对目前配电网故障定位方法存在的局限性,通过分析谐振接地系统变电站出线端线路故障和故障点前后零序电流的特征,提出了一种基于零序电流增量法的单相接地故障定位方法。建立了基于DIGSILENT Power Factory的谐振接地单相接地故障仿真数学模型,对接地过渡电阻、不同补偿度和故障点位置等情况分别进行仿真,得到零序电流波形及其幅值。仿真结果表明,这些影响因素对故障定位的准确性有一定的影响,但在一定的范围内该方法能够较好地适应工程应用中可能存在的影响因素,具有鲁棒性好、可靠性高等特点。

杨家全 冯 勇/云南电网有限责任公司电力科学研究院 王科龙/上海金智晟东电力科技有限公司 邵 武 张贵鹏/云南电网有限责任公司玉溪供电局



杨家全/高级工程师

关键词/Keywords

配电网 ·
故障定位 ·
零序电流 ·
谐振接地 ·

我国的中压配电网基本上采用中性点不接地或经谐振接地(消弧线圈接地)的运行方式。当系统发生单相接地故障时,线电压仍然保持对称,不影响对负荷的供电,规程规定可继续运行0.5~2 h,但非故障相电压却升高为线电压,当发生间歇性弧光接地时将引起弧光过电压,并极易扩大为相间短路,因此需要尽快确定故障点的位置,并且排除故障^[1]。谐振接地系统发生单相接地故障时的故障电流较小,可供提取的故障特征不够明显,且又受接地过渡电阻、补偿度和故障点位置不同等因素的影响,所以单相接地故障定位一直以来都是配电网的一个技术难题。

目前,国内外已有多篇文献对配电网故障定位进行研究。如基于零序稳态信号的群体比幅比相算法^[2]、五次谐波分量法^[3]和零序导纳法^[4],但这些方法均受线路长短的影响,当线路较短时,零序电流幅值很小,此时零序电流的相位

误差将很大,从而影响故障定位的准确性。近年来,又有人提出了基于暂态零序电流的小波法^[5]和HHT法^[6],但由于配电网发生单相接地故障时的暂态过程持续时间很短,对暂态信号的采集难度较大。文献[7]提出了基于行波法的离线故障定位技术,但在实际应用中,用户对供电可靠性的要求很高,使得其实用性受到了较大的限制。

本文应用DIGSILENT Power Factory软件建立了一种谐振接地系统的单相接地故障仿真数学模型,通过分析系统在发生单相接地故障时故障线路和非故障线路零序电流的特征,提出了一种基于零序电流增量法的故障判断和定位的方法,利用消弧线圈参数改变前后的零序电流的变化量来确定故障的位置,并对接地过渡电阻、不同补偿度和故障点位置等情况进行仿真,分析这些因素对零序电流和故障定位准确性的影响。

零序电流增量故障定位法的原理

谐振接地系统发生单相接地故障时,通过改变消弧线圈的参数可以补偿系统电流,正常情况下消弧线圈处于过补偿状态,故障后调整为全补偿状态^[8]。在经消弧线圈接地的10 kV变电站往往有很多出线端,且各个出线端有很多线路分支,故障与非故障出线端线路分支的零序电流以及线路故障点前后的零序电流具有不同的特征。

1. 10 kV变电站出线端线路故障特征分析

假设某10 kV变电站有 n 回出线,当

出线2发生单相接地故障时, 谐振接地系统零序等效电路如图1所示。图1给出了各个变压器的联接组, 由于该系统的10 kV配电网侧的主变压器绕组为三角形接法, 不能形成中性点, 因此需要通过Z型变压器来引出中性点。且在接地变压器的中性点接电感和电阻来等效表示消弧线圈, 正常情况

下开关S断开, 电抗和电阻值为 X_{L_1} 、 R_1 ; 故障时开关S闭合, 电抗值为 X_{L_2} , 电阻值为0。消弧线圈参数改变前后零序电压分别为 $\dot{U}_{01}$ 和 $\dot{U}_{02}$, 零序电流分别为 $\dot{I}_{01}, \dot{I}_{02}, \dots, \dot{I}_{0n}$ 和 $\dot{I}'_{01}, \dot{I}'_{02}, \dots, \dot{I}'_{0n}$, 消弧线圈支路的零序电流分别为 $\dot{I}_{0L}$ 和 $\dot{I}'_{0L}$, 各线路的对地电容值分别为 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 。

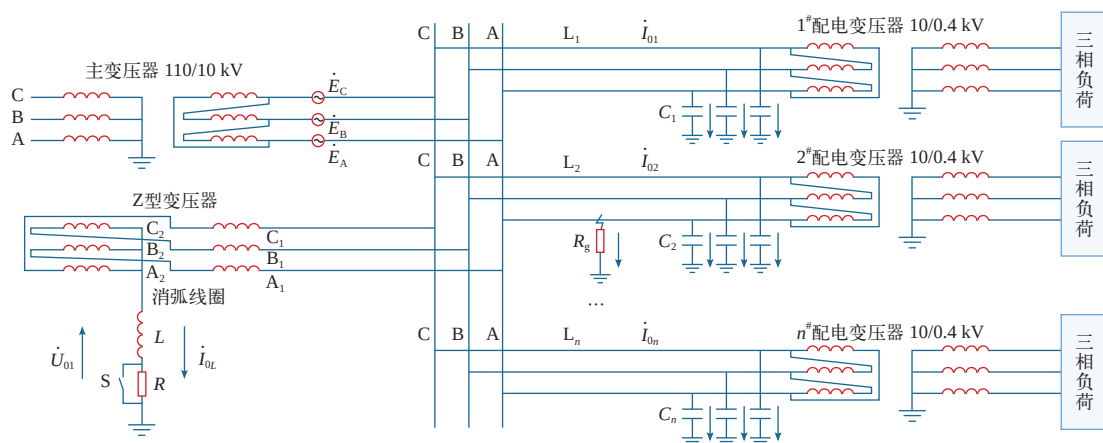


图1 谐振接地系统零序等效电路

当系统发生单相金属接地时, 消弧线圈参数改变前后零序电压基本不变^[9], 即 $\dot{U}_{01} \approx \dot{U}_{02}$, 此时零序电流增量为

$$\Delta \dot{I}_{0i} = \dot{I}_{0i} - \dot{I}'_{0i} = 0 \quad i = 1, 3, \dots, n \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{02} &= \dot{I}_{02} - \dot{I}'_{02} \\ &= \dot{I}_{0L} - (\dot{I}_{01} + \dot{I}_{03} + \dot{I}_{04}) - [\dot{I}'_{0L} - (\dot{I}'_{01} + \dot{I}'_{03} + \dot{I}'_{04})] \quad (2) \\ &= \dot{I}_{0L} - \dot{I}'_{0L} = \dot{U}_{01} / (R_1 + j\omega L_1) - \dot{U}_{01} / (j\omega L_2) \neq 0 \end{aligned}$$

当系统发生单相经电阻接地时, 由于消弧线圈参数的改变会导致零序电压的变化, 因此在计算零序电流时需折算至同一零序电压下。对于非故障线路有 $j\omega C_i = \dot{I}_{0i} / \dot{U}_{01}$ 和 $j\omega C_i = \dot{I}'_{0i} / \dot{U}_{02}$, 故有

$$\dot{I}_{0i} = \dot{I}'_{0i} \dot{U}_{01} / \dot{U}_{02} \quad (3)$$

将各条线路在消弧线圈参数改变前后的零序电流折算至同一个零序电压, 其零序电流增量为

$$\Delta \dot{I}_{0i} = \dot{I}_{0i} - \dot{I}'_{0i} \dot{U}_{01} / \dot{U}_{02} = 0 \quad i = 1, 3, \dots, n \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_{02} &= \dot{I}_{02} - \dot{I}'_{02} \dot{U}_{01} / \dot{U}_{02} = \dot{I}_{0L} - (\dot{I}_{01} + \dot{I}_{03} + \dot{I}_{04}) - \\ &\quad [\dot{I}'_{0L} - (\dot{I}'_{01} + \dot{I}'_{03} + \dot{I}'_{04})] \dot{U}_{01} / \dot{U}_{02} \quad (5) \\ &= \dot{I}_{0L} - \dot{I}'_{0L} \dot{U}_{01} / \dot{U}_{02} \\ &= \dot{U}_{01} / (R_1 + j\omega L_1) - \dot{U}_{01} / (j\omega L_2) \neq 0 \end{aligned}$$

综合式(1)、式(2)、式(4)和式(5)可知, 当线路发生单相接地故障时, 故障线路中的零序电流将会发生变化, 而非故障线路的零序电流保持不变。

2. 线路故障点前后零序电流特征分析

图2为一条线路分支在负荷开关B和C之间发生单相接地故障, 由前文内容可知, 负荷开关A出线处零序电流与消弧线圈的参数相关, 消弧线圈参数改变前, 负荷开关B和负荷开关C出线处的零序电流分别为

$$\dot{I}_B = \dot{I}_S - j\omega C_1 \dot{U}_{01} \quad (6)$$

$$\dot{I}_C = j\omega C_2 \dot{U}_{01} \quad (7)$$

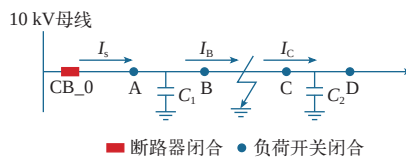


图2 线路故障点前后零序电流特征分析示意图

消弧线圈参数改变后, 负荷开关B和负荷开关C出线处的零序电流分别为

$$\dot{I}'_B = \dot{I}'_S - j\omega C_1 \dot{U}_{02} \quad (8)$$

$$\dot{I}'_C = j\omega C_2 \dot{U}_{02} \quad (9)$$

同理，将消弧线圈参数改变前后的零序电流均折算到同一个零序电压上计算，故有

$$\begin{aligned} \Delta \dot{I}_B &= \dot{I}_B - \dot{I}'_B \dot{U}_{01} / \dot{U}_{02} \\ &= (\dot{I}_S - j\omega C_1 \dot{U}_{01}) - (\dot{I}'_S - j\omega C_1 \dot{U}_{02}) \dot{U}_{01} / \dot{U}_{02} \\ &= \dot{I}_S - \dot{I}'_S \dot{U}_{01} / \dot{U}_{02} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} &= \dot{U}_{01} / (R_1 + j\omega L_1) - \dot{U}_{01} / (j\omega L_2) \neq 0 \\ \Delta \dot{I}_C &= \dot{I}_C - \dot{I}'_C \dot{U}_{01} / \dot{U}_{02} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

由式(10)、式(11)可知，当消弧线圈参数改变时，若将零序电流折算至同一零序电压下，故障点之前的线路零序电流发生变化，而故障点之后的线路零序电流不变。

综上所述，利用零序电流增量法进行故障定位是简单有效的。实际应用中可采用“先定段，再定点”的方式进行故障定位，利用式(1)、式(2)或式(4)、式(5)即可首先判断出哪一条出线发生故障，最后利用式(10)、式(11)可在该线路范围内确定故障点的位置。

系统仿真及分析

1. 系统建模和参数设置

利用DIGSILENT Power Factory构建了一个含有4条出线的架空线与电缆混合的谐振接地系统。图3为谐振接地系统单相接地故障仿真模型，模型中省略了10/0.4 kV的配电变压器和三相平衡的负荷。

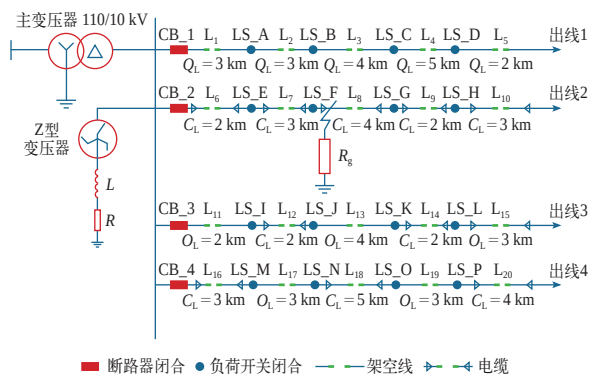


图3 谐振接地系统单相接地故障仿真模型示意图

图3中，主变压器容量为31.5 MV·A，Z型变压器的零序阻抗为10 Ω，配电变压器容量为1 MV·A，三相负荷的有功功率为0.35 MW，功率因数为0.95。架空线和电缆均采用分布参数模型，线路长度在

图3中已经标出，其中 O_L 为架空线的长度， C_L 为电缆的长度。架空线的正序阻抗为 $Z_1 = (0.17 + j0.38) \Omega/\text{km}$ ，正序电纳为 $3.05 \mu\text{S}/\text{km}$ ，零序阻抗 $Z_0 = (0.23 + j1.72) \Omega/\text{km}$ ，正序电纳为 $1.88 \mu\text{S}/\text{km}$ ；电缆的正序阻抗为 $Z_1 = (0.078 + j0.085) \Omega/\text{km}$ ，正序电纳为 $218.34 \mu\text{S}/\text{km}$ ，零序阻抗 $Z_0 = (0.106 + j0.384) \Omega/\text{km}$ ，正序电纳为 $1.88 \mu\text{S}/\text{km}$ ^[10]。

2. 系统仿真分析

由于谐振接地系统单相接地故障与接地过渡电阻、补偿度和故障点位置等因素有关，首先以出线2的分支 L_8 的中间位置发生单相非金属接地故障（ $R_g = 10 \Omega$ ， $P = 15\%$ ）进行仿真分析，得到各个出线端线路以及故障点前后负荷开关侧的零序暂态电流波形，并对其零序稳态电流的幅值进行综合分析，得到故障点的位置。

消弧线圈参数改变前后出线1，出线3和出线4的零序电流波形以及出线2故障点前后的负荷开关LS_F和LS_G的零序电流波形分别如图4、图5所示。图中，在 $t = 0.1 \text{ s}$ 时刻发生A相永久性接地故障。

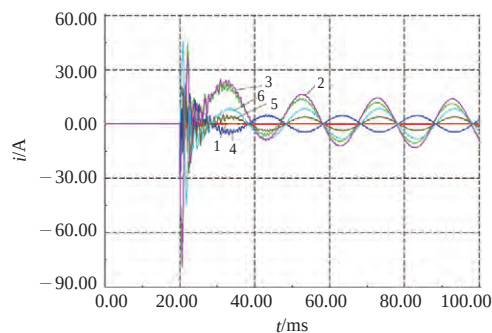


图4 消弧线圈参数改变前的零序电流

- 1—出线1始端零序电流 2—出线2始端零序电流
- 3—负荷开关LS_F零序电流 4—负荷开关LS_G零序电流
- 5—出线3始端零序电流 6—出线4始端零序电流

由图4、图5可知，消弧线圈参数改变后各个线路的零序电流均发生变化，但由于暂态过程持续时间较短，不易于测量，因此为了对故障进行准确定位，需要记录消弧线圈参数改变前后各线路的零序稳态电流有效值，并且根据消弧线圈参数改变前后的零序电压值 $\dot{U}_{01}$ 和 $\dot{U}_{02}$ 将零序电流折算至同一零序电压下，得到消弧线圈改变后零序电流的折算值，零序电流有效值和折算值如表1所

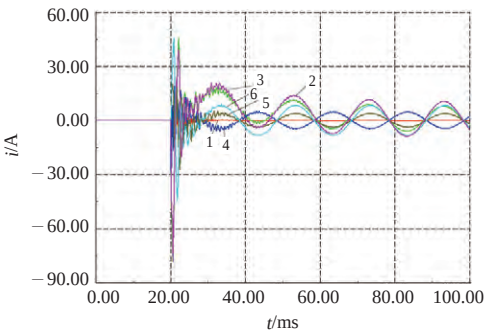


图5 消弧线圈参数改变后的零序电流

1—出线1始端零序电流 2—出线2始端零序电流
3—负荷开关LS_F零序电流 4—负荷开关LS_G零序电流
5—出线3始端零序电流 6—出线4始端零序电流

示。其中， I_1 、 I_2 、 I_3 和 I_4 分别为各个出线端的零序电流； I_{LS_F} 、 I_{LS_G} 分别为故障点前后的负荷开关侧的零序电流。

表1 零序电流有效值和折算值

零序电流变化量	I_1/A	I_2/A	I_{LS_F}/A	I_{LS_G}/A	I_3/A	I_4/A
改变前	0.149	10.483	8.604	3.197	2.625	5.839
改变后	0.151	6.979	5.060	3.221	2.649	5.891
折算值	0.150	6.944	5.034	3.195	2.625	5.836

由表1可知，出线端1、出线3和出线4的零序电流在消弧线圈参数改变前后改变很小（仅为几毫安），出线端2的零序电流则变化了3.539 A，由此可知，故障发生在出线端2的线路上；对于线路2，故障点前的负荷开关LS_F侧零序电流变化了3.57 A，故障点后的负荷开关LS_G侧变化了2 mA，由此可判断故障点位于负荷开关LS_F与LS_G之间。

3. 接地过渡电阻影响分析

下面以出线2的分支 L_g 的中间位置分别经过50 Ω、500 Ω、5 000 Ω和10 000 Ω过渡电阻发生A相单相接地（ $P=15\%$ ）为例进行分析，消弧线圈参数改变前后的零序电流有效值以及折算值如表2所示。

由表2可知，随着故障接地过渡电阻的增加，非故障线路和故障线路的零序电流幅值不断减小，消弧线圈参数改变前后系统的零序电压差别也越来越大。当接地电阻达到10 000 Ω时，故障线路零序电流还达不到1 A，这就对零序电流传感器的测量准确度提出了更高的要求，经折算后的故障点前后的负荷开关侧的零序电流变化值也从 $R_g=$

表2 接地过渡电阻不同时的零序电流有效值和折算值

零序电流变化量		I_1/A	I_2/A	I_{LS_F}/A	I_{LS_G}/A	I_3/A	I_4/A
$R_g=50\ \Omega$	改变前	0.144	9.284	7.471	3.089	2.537	5.642
	改变后	0.149	6.883	4.992	3.177	2.614	5.812
	折算后	0.145	6.685	4.849	3.086	2.414	5.645
$R_g=500\ \Omega$	改变前	0.099	6.392	5.144	2.127	1.747	3.885
	改变后	0.127	5.904	4.281	2.725	2.242	4.985
	折算后	0.099	4.599	3.335	0.953	1.746	3.883
$R_g=5\ 000\ \Omega$	改变前	0.021	1.347	1.084	0.448	0.368	0.819
	改变后	0.045	2.080	1.508	0.960	0.790	1.750
	折算后	0.021	0.966	0.700	0.446	0.367	0.813
$R_g=10\ 000\ \Omega$	改变前	0.011	0.71	0.571	0.236	0.194	0.432
	改变后	0.025	1.174	0.851	0.54	0.446	0.991
	折算后	0.011	0.509	0.260	0.234	0.202	0.430

50 Ω时的2.622 A减小到0.311 A，在现场中往往由于测量仪器存在一定的误差，使得故障点前后的变化量更小，这就可能导致误判。

4. 补偿度影响分析

系统发生单相接地故障时，消弧线圈提供一个感性电流用来补偿系统的对地容性电流，且由正常情况下的过补偿状态改变为全补偿状态，因此消弧线圈的补偿度对零序电流的分布有着较大的影响。同样地，由于零序电流与接地过渡电阻等众多因素的影响，下面以出线2的分支 L_g 的中间位置分别在补偿度 P 为3%、5%、9%和15%时发生A相单相接地（ $R_g=20\ \Omega$ ）为例进行分析，消弧线圈参数改变前后的零序电流有效值和折算值如表3所示。

表3 补偿度不同时的零序电流有效值和折算值

零序电流变化量		I_1/A	I_2/A	I_{LS_F}/A	I_{LS_G}/A	I_3/A	I_4/A
$P=3\%$	改变前	0.149	8.133	6.273	3.179	2.613	5.811
	改变后	0.150	6.953	5.043	3.210	2.640	5.872
	折算后	0.148	6.882	4.992	3.177	2.613	5.812
$P=5\%$	改变前	0.149	8.513	6.651	3.177	2.611	5.807
	改变后	0.150	6.953	5.043	3.210	2.640	5.872
	折算后	0.148	6.875	4.987	3.174	2.611	5.806
$P=9\%$	改变前	0.148	9.262	7.400	3.173	2.607	5.798
	改变后	0.150	6.953	5.043	3.210	2.640	5.872
	折算后	0.148	6.868	4.982	3.171	2.608	5.800
$P=15\%$	改变前	0.148	10.384	8.523	3.167	2.600	5.783
	改变后	0.150	6.953	5.043	3.210	2.640	5.872
	折算后	0.148	6.793	4.966	3.161	2.600	5.783

由表3可知,随着消弧线圈补偿度的增加,非故障线路以及故障点后的零序电流变化很小,系统的零序电压变化也很小,而故障线路和故障点前的零序电流则有较大的增加,且故障线路和故障点前的零序电流增量也越来越大,故障线路的零序电流增量由 $P=3\%$ 时的1.251 A增加到 $P=15\%$ 时的3.591 A。因此,随着消弧线圈补偿度的增加,故障定位的准确性越来越高,且在正常情况下通常取补偿度为15%。

5. 故障点位置影响分析

当单相接地故障发生在同一类型线路不同故障位置时,由于故障位置距离母线的距离不同而直接导致了线路的特征阻抗不同,这将会直接影响零序电流波形的暂态过程。同时,中性点经消弧线圈接地系统零序电流的大小主要取决于系统的电容分布,当故障距离改变到一定程度使得系统的电容分布改变时也会使得零序电流有明显的变化。下面以出线2的分支 L_8 的首部、30%、60%和末端发生A相单相金属接地($R_g=20\ \Omega$, $P=15\%$)为例进行说明。其对应的零序稳态电流有效值如表4所示。

表4 故障点位置不同时的零序电流有效值

故障点位置		零序电流有效值					
		I_1/A	I_2/A	I_{LS_F}/A	I_{LS_G}/A	I_3/A	I_4/A
首端	改变前	0.148	9.555	7.689	3.178	2.611	5.808
	改变后	0.150	6.965	5.051	3.215	2.644	5.881
30%	改变前	0.148	9.542	7.679	3.174	2.608	5.80
	改变后	0.150	6.960	5.046	3.212	2.642	5.875
60%	改变前	0.148	9.529	7.669	3.171	2.604	5.792
	改变后	0.150	6.951	5.041	3.209	2.639	5.870
末端	改变前	0.147	9.513	7.655	3.166	2.599	5.782
	改变后	0.149	6.942	5.034	3.204	2.636	5.862

由表4可知,当故障位于同一类型线路的不同位置时,随着故障点距离母线的距离越来越远时,故障线路和非故障线路的零序电流均在不断减小,但由于故障线路的长度不足以使线路的分布电容变化较大,因此各线路的零序电流变化量较小。

结束语

通过DIGSILENT Power Factory构建了10 kV谐

振接地系统的仿真数学模型,并针对单相接地故障进行了分析和仿真,得到了零序电流的波形和数据,据此得到以下结论。

1) 提出了基于零序电流增量法的单相接地故障定位方法,通过分析比较消弧线圈参数改变前后的零序电流和零序电压值来确定故障线路和故障点,从而验证了该方法的可行性和有效性。

2) 各线路的零序电流幅值与故障点的接地过渡电阻有关,随着接地过渡电阻的增加,非故障线路和故障线路的零序电流幅值不断减小,检测难度高,同时故障线路和非故障线路以及故障点前后负荷开关的零序电流改变量也不断减小,容易导致误判,因此单相经高阻接地故障的选线有待进一步的研究。

3) 各线路的零序电流幅值与消弧线圈的补偿度有关,随着补偿度的增加,故障线路和故障点前的零序电流不断增加,非故障线路和故障点后的零序电流基本不变;同时,故障线路和故障点前的零序电流增量也不断增加,故障定位的准确性越来越高。

4) 各线路的零序电流幅值与故障点的位置有关,随着故障点距离母线的距离越来越远,故障线路和非故障线路的零序电流均在不断减小。

参考文献

[1] 齐郑,杨以涵.中性点非有效接地系统单相接地选线技术分析[J].电力系统自动化,2004,28(14):1-5.

[2] 庞清乐,陈生银.基于人工免疫算法的小电流接地故障选线[J].电力系统保护与控制,2009,37(24):27-31.

[3] 黄强,王毅,刘思佳.五次谐波法对小电流接地系统的故障定位[J].仪器仪表用户,2008,15(1):122-124.

[4] 林湘宁,高艳,刘沛,等.基于零序补偿导纳的小电流接地系统单相故障保护新方法[J].中国电机工程学报,2006,26(10):45-49.

[5] 王耀南,霍百林,王辉,等.基于小波包的小电

(下转第75页)

- 34 (8) : 101-105.
- [4] Sun J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions Power Electronics, 2011, 26 (11) : 3075-3078.
- [5] Sun J. Small-signal methods for ac distributed power systems-a review [J]. IEEE Transactions Power Electronics, 2009, 24 (11) : 2545-2554.
- [6] Fan L, Kavasseri R, Miao Z, et al. Modeling of DFIG-based wind farms for SSR analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25 (4) : 2073-2082.
- [7] Bowler C E J, Baker D H, Mincer N A, et al. Operation and test of the navajo SSR protective equipment [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, PAS-97 (4) : 1030-1035.
- [8] Bowler C E J, Demcko J A, Menkoft L, et al. The navajo SMF type subsynchronous resonance relay [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, PAS-97 (5) : 1489-1495.
- [9] Piwko R J, Wegner C A, Kinney S J, et al. Subsynchronous resonance performance tests of the slatt thyristor-controlled series capacitor [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11 (2) : 1112-1119.
- [10] Irwin G D, Jinda A K, Isaacs A L. Sub-synchronous control interactions between type 3 wind turbines and series compensated AC transmission systems [C]. Power and Energy Society General Meeting, 2011: 1-6.
- [11] Suriyaarachchi D H R, Annakkage U D, Karawita C, et al. Application of an SVC to damp sub-synchronous interaction between wind farms and series compensated transmission lines [C]. Power and Energy Society General Meeting, 2012: 1-6.
- [12] 孟昭军. 风电并网与进展研究 [J]. 电网与清洁能源, 2012, 28 (3) : 61-66.
- [13] 白建华, 辛颂旭, 贾德香. 我国风电大规模开发面临的规划和运行问题分析 [J]. 电力技术经济, 2009, 21 (2) : 8-11.
- [14] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响 [J]. 电网技术, 2007, 31 (3) : 77-81.
- [15] 伊专, 刘天琪, 李兴源, 等. 基于SVC的大型风电场次同步谐振抑制 [J]. 华东电力, 2012, 40 (7) : 1134-1139.
- (收稿日期: 2015-02-10) EA

(上接第68页)

- 流接地系统故障选线的新判据 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (6) : 54-58.
- [6] 张耘川, 苏宏升. 小电流接地系统故障定位新方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27 (2) : 32-38.
- [7] 董新洲, 王珺, 施慎行, 等. 配电线路单相接地行波保护的原理与算法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (10) : 154-160.
- [8] 周淦, 马小敏, 陈伟根, 等. 基于Zigbee和零序电流增量法的配网单相接地故障定位方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (9) : 62-68.
- [9] 倪广魁, 鲍海, 张利, 等. 基于零序电流突变量的配电网单相故障带电定位判据 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (31) : 118-122.
- [10] 李林, 冯勇, 郑剑飞, 等. 中性点采用两种接地方式的配电网单相接地故障的比较 [J]. 高压电器, 2008, 44 (3) : 239-242.
- (收稿日期: 2015-02-09) EA