

DOI: 10.7667/PSPC161313

# 基于参数识别光伏接入配网永久性故障判别方法

李育强<sup>1</sup>, 宋国兵<sup>2</sup>, 王维庆<sup>1</sup>, 晁勤<sup>1</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 为了解决光伏系统接入配电网前加速自动重合闸重合于永久性故障的问题, 提出了适用于光伏接入配电网的三相重合闸永久性故障判别方法。该方法以线路瞬时性故障为参考模型, 通过建立线路故障线模分量数学模型, 采用最小二乘算法识别线路相间电容, 根据相间电容识别误差大小建立了永久性故障识别判据。当线路发生瞬时性故障时, 识别值与实际值接近; 而当线路发生永久性故障时, 识别值与真实值差异较大。通过在 PSCAD 下建立仿真模型, 对光伏接入配电网线路发生瞬时性故障和永久性故障进行仿真。仿真结果表明, 该方法能够正确识别光伏接入配电网线路的故障类型, 从而验证了该方法的正确性与有效性。

**关键词:** 参数识别; 光伏系统; 配电网; 电容参数; 故障判别

## Permanent fault identification method based on parameter identification for photovoltaic access to distribution network

LI Yuqiang<sup>1</sup>, SONG Guobing<sup>2</sup>, WANG Weiqing<sup>1</sup>, CHAO Qin<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of pre-acceleration auto reclosing is coincident with the permanent fault when the photovoltaic system is connected to the distribution network, a new method is proposed for permanent fault diagnosis of three phase auto reclosing for photovoltaic power distribution network. This method takes the transient fault model as reference, the mathematical model of linear model of line fault is established, the least square algorithm is used to identify the line phase capacitance, a permanent fault identification criterion is established based on the identification error of the phase to phase capacitance. The recognition value is close to the actual value when the line is transient fault; the difference between the recognition value and the real value is larger and when the line is permanent fault. A simulation model is established by using the PSCAD, the transient fault and permanent fault are simulated for the grid connected photovoltaic system. Simulation results show that the proposed method can identify the fault types of the grid connected PV system, and the correctness and validity of the method is verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51367017).

**Key words:** parameter identification; photovoltaic system; distribution network; capacitance parameter; fault discrimination

## 0 引言

由于分布式光伏的接入, 改变了配电网的供电模式, 随着光伏接入容量的不断增加, 对配电网保护的影响也越加明显, 为提高配电网(以下简称: 配网)的供电可靠性, 配网在线路首端通常会配备前加速自动重合闸装置, 前加速自动重合闸的优点主要

体现在: 瞬时性故障清除后, 线路重新投入运行, 提高了供电可靠性。但是, 如果重合于永久性故障将对光伏设备造成二次冲击, 因此研究适用于光伏接入配网的故障判别方法具有重要的现实意义。

目前, 国内外学者研究故障判别的原理主要分为三类, 第一是基于恢复电压特性的方法; 第二是基于故障电弧特性的方法; 第三是基于在线辨识参数的方法。文献[1-6]采用参数辨识的思想对带并联电抗器的高压输电线路参数进行识别, 利用瞬时性

故障和永久性故障识别参数的差异来区分瞬时性故障与永久性故障。文献[7]提出将负序功率方向比较与聚类算法相结合的继电保护新算法。文献[8]依据瞬时性故障与永久性故障下电弧燃烧特性的不同,采用傅里叶变换和小波变换对突变量信号进行分解,建立了故障判据进行瞬时性故障和永久性故障的判别。文献[9]提出了一种基于供电安全标准的配电网故障诊断方法。文献[10-14]从神经网络、二次电弧电压幅频特性入手,分析线路在发生瞬时性故障与永久性故障下电气量的差异,构建故障判据,正确区分瞬时性故障与永久性故障。上述研究对象均为高压输电线路,且在线路一端或者两端都并联有电抗器,国内外学者针对配网故障判别的研究成果较少,研究光伏接入配网的故障判别论文更是鲜有见到。

因此,在分析光伏接入配网输电线路发生瞬时性故障与永久性故障机理的基础上,构建了基于线模分量的瞬时性故障数学模型,通过提取线路两端保护的电气量,使用参数辨识原理,辨识线路电容参数,瞬时性故障时辨识参数与实际值相差较小,永久性故障时差异明显,从而进行故障判别。仿真结果表明,该方法不受故障类型、位置以及过渡电阻的影响,具有良好的适应性。

### 1 光伏接入配网对重合闸的影响分析

在输电线路发生的故障,按照故障持续时间和故障点绝缘强度是否及时恢复,可将故障分为瞬时性故障与永久性故障。瞬时性故障通常是由于自然因素,例如雷电、大风、飞禽以及树枝掉落在线路上而引起的短路,短路后继电保护装置迅速动作切除故障点,故障点电弧随即熄灭,故障点的绝缘强度迅速恢复,由于故障点已消失重合闸重合成功,线路重新恢复供电。永久性故障是指由于输电线路发生杆塔倒地、线路断线、绝缘损毁等引起的故障,此类故障由于故障点持续存在,将导致重合闸重合失败。根据电力系统运行实际情况来看,瞬时性故障约占 80%,为防止重合闸重合于永久性故障,输电线路应具有故障判别能力。其次,按照国家标准 GB/T19964-2012<sup>[9]</sup>中光伏电站应具有低电压穿越(Low-Voltage Ride Through, LVRT)的能力,光伏的接入对重合闸时序操作具有较大的影响,其具体影响分析如下。

在如图 1 所示的配网中,加入光伏 PV (Photovoltaic),使原单电源系统转换成一个双电源系统。

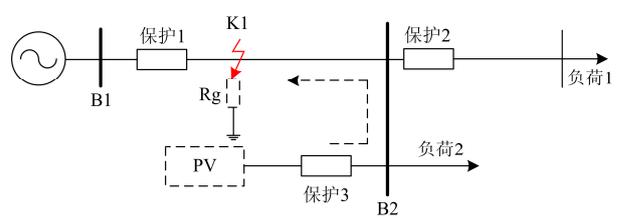


图 1 PV 接入配电网短路故障实例示意图

Fig. 1 Example of short circuit fault diagram PV access distribution network

假设在 K1 点发生瞬时性短路故障,保护 1 跳闸,受 PV 低电压穿越能力的影响,PV 出口断路器将在 625 ms 后跳闸,如果重合闸重合时间整定的过小,将使得 K1 故障点不能在保护 1 配置的前加速重合闸的合闸时间内消失,导致重合失败。继而造成母线 B1 后方整体配电网全面停电。如果 K1 点发生永久性故障,存在系统设备与光伏电源遭受二次冲击的问题。

因此,PV 接入后,对配网重合闸时间配置以及负荷供电的持续性有影响。需建立适应于配网输电线路的识别模型,正确识别故障类型,避免自动重合闸重合于永久性故障。

### 2 光伏接入配网故障判别原理

当光伏接入相邻线路时,发生故障后在前加速重合闸的作用下,本线路首端保护装置动作切除故障,相邻线路光伏进入 LVRT,本线路失去外部激励,成为零输入电路。当光伏接于本线路时,故障发生后,同样线路首端保护装置无选择地动作切除故障,本线路光伏进行 LVRT,由于是本线路发生故障,625 ms 后光伏 LVRT 穿越失败,线路呈自激状态。

#### 2.1 基于差动电流的故障判别原理

线路失去外部激励源后,线路的储能元件开始放电,线路的储能元件包括线路电容及电感,从而构成自激振荡回路。由于保护都是按相操作,因此选取 a 相进行分析,此时线路发生瞬时性故障和永久性故障线模分量模型如图 2 所示。

图 2(a)和图 2(b)的区别是多了一条故障分支线路。其次,配电网由于线路长度较短,通常采用集中参数模型,对于瞬时性故障线模分量模型列写微分方程较容易。对于永久性故障线模分量模型,由于故障点的不确定性,列写微分方程较难,因此,采用瞬时性线模分量模型作为参照模型。提取线路两端的电压和电流,将其带入所建立的瞬时性线模分量微分方程,采用最小二乘算法识别线路相间电

容值。当瞬时性故障时识别误差较小; 当发生永久性故障时识别误差较大, 因此根据相间电容识别值误差的大小即可判别瞬时性故障和永久性故障。

光伏接入配网三相重合闸时序过程可分为 4 个阶段, 时序图如图 3 所示。

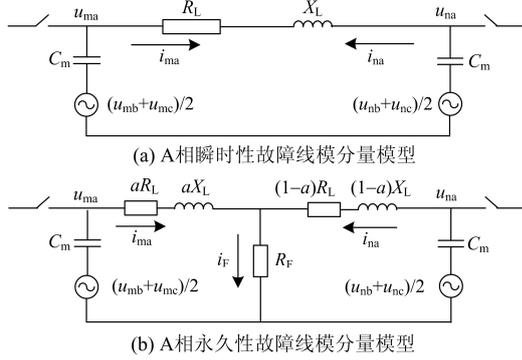


图 2 线模分量故障模型

Fig. 2 Fault model of linear model

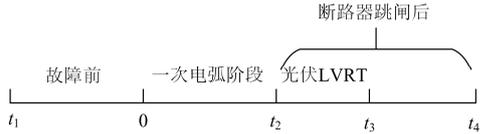


图 3 光伏接入配网前加速自动重合闸动作时序

Fig. 3 Pre-acceleration automatic reclosing operation sequence photovoltaic access distribution network

故障发生在 0 时刻,  $0 \sim t_2$  为一次电弧阶段, 在此阶段判断为线路故障, 断路器动作切除故障, 随后光伏电源进入低电压穿越, 因此,  $t_2 \sim t_3$  为 625 ms, 由于故障发生在本线路, 光伏低电压穿越失败,  $t_3 \sim t_4$  为故障判别阶段。因此, 光伏接入配网前加速重合闸重合时间应大于等于  $t_4$  为宜。

## 2.2 线路瞬时性故障模型

当线路发生故障, 系统电源断路器在  $t_2$  时刻跳开, 直至  $t_3$  时刻光伏低电压穿越失败, 光伏出口断路器跳开, 线路失去外部激励, 呈现自由震荡状态, 线路对地电容和相间电容持续放电, 线路瞬时性故障模型如图 4 所示。

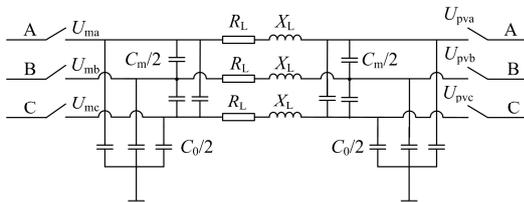


图 4 线路瞬时性故障等值模型

Fig. 4 Equivalent model in line instantaneous fault

图 4 中  $U_{ma}$ 、 $U_{mb}$  和  $U_{mc}$  分别为 m 端保护处测得的三相电压,  $U_{pva}$ 、 $U_{pvb}$  和  $U_{pvc}$  为光伏侧保护处测得的三相电压,  $R_L$  和  $X_L$  为线路的阻抗,  $C_m$  为线路间的互电容,  $C_0$  为线路对地电容, 为分析方便, 假设瞬时性故障发生在 AB 相, 以 A 相为例, 瞬时故障线模分量等效模型如图 5 所示。

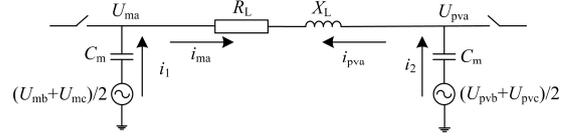


图 5 光伏接入配网线路瞬时性故障线模分量模型

Fig. 5 Instantaneous fault line mode component model of photovoltaic access distribution network line

对图 5 中 A 相瞬时性线模分量应用基尔霍夫电流定律可得式(1)。

$$i_{ma} + i_{pva} = i_1 + i_2 \quad (1)$$

式(1)中,  $i_1 \sim i_2$  的解析式如式(2)。

$$\begin{cases} i_1 = \frac{c_m}{2} \left( \frac{du_{mb}}{dt} + \frac{du_{mc}}{dt} \right) - c_m \frac{du_{ma}}{dt} \\ i_2 = \frac{c_m}{2} \left( \frac{du_{pvb}}{dt} + \frac{du_{pvc}}{dt} \right) - c_m \frac{du_{pva}}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 整理后得式(3)。

$$i_{ma} + i_{pva} = \frac{c_m}{2} \left( \frac{du_{mb} + du_{mc} + du_{pvb} + du_{pvc}}{dt} \right) - (c_m) \left( \frac{du_{ma} + du_{pva}}{dt} \right) \quad (3)$$

规定线路电流方向由母线流向线路为正, 当线路发生瞬时性故障时, 待去游离完成即电弧熄灭后, 故障线路两端电流可等效为从一端流入然后从另一端流出, 即两个电流模值相等, 相位相差  $180^\circ$ , 因此有式(4)。

$$i_{ma} = -i_{pva} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可知, 方程中两端电压值和电流值可从保护装置中获取, 即为已知量。方程中  $C_m$  为待求量, 方程为一元一次方程, 只有零解; 但是, 在线路发生短路故障时, 受三相断路器跳闸不同步的影响, 总会存在不平衡电流, 因此识别方程右端不为零, 能够解出解析解。将此结论推广到 B 相和 C 相, 可得式(5)。

$$\begin{cases} A_1 C_m = i_{ma} + i_{pva} \\ A_2 C_m = i_{mb} + i_{pvb} \\ A_3 C_m = i_{mc} + i_{pvc} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中  $A_1$  的表达式如式(6)。

$$A_1 = \left( \frac{du_{mb} + du_{mc} + du_{nb} + du_{nc}}{dt} \right) / 2 - \left( \frac{du_{ma} + du_{na}}{dt} \right) \quad (6)$$

式(5)的离散表达式可以表示为式(7)。

$$\begin{cases} A_1(k)C_m = i_{ma}(k) + i_{pva}(k) \\ A_2(k)C_m = i_{mb}(k) + i_{pvb}(k) \\ A_3(k)C_m = i_{mc}(k) + i_{pvc}(k) \end{cases} \quad k=1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

分析式(7)可知,采集线路两端的电压值和电流值,由一对数值即可解得  $C_m$  的值,为减小模型误差的影响,采用最小二乘算法对  $C_m$  进行在线辨识,以此提高辨识精度,采用一阶差分代替微分环节,采用中心差分方式,限于篇幅有限  $A_2$  和  $A_3$  表达式与  $A_1$  类似,因此只给出  $A_1$  的离散解析式,其表达式为式(8)。

$$A_1(k) = \frac{1}{2} \left[ \begin{array}{c} \left( \frac{u_{mb}(k+1) - u_{mb}(k-1)}{2T_s} \right) + \\ \left( \frac{u_{mc}(k+1) - u_{mc}(k-1)}{2T_s} \right) + \\ \left( \frac{u_{pvb}(k+1) - u_{pvb}(k-1)}{2T_s} \right) + \\ \left( \frac{u_{pvc}(k+1) - u_{pvc}(k-1)}{2T_s} \right) \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \left( \frac{u_{ma}(k+1) - u_{ma}(k-1)}{2T_s} \right) + \\ \left( \frac{u_{pva}(k+1) - u_{pva}(k-1)}{2T_s} \right) \end{array} \right] \quad (8)$$

式(8)中,  $T_s$  为采样周期。

### 2.3 基于参数识别的光伏接入配网永久性故障判别判据

当线路发生瞬时性故障,三相电路分相故障模型与计算模型一致,分相独立辨识的线路电容值与实际电容值相差较小,辨识结果稳定且波动量小。当线路发生永久性故障时,分相故障模型与计算模型不一致,辨识的电容参数与实际值差异明显,具有较好的辨识度,非故障相虽然故障模型与计算模型一致,但是受故障相电压的影响,辨识值与实际值差异也较大<sup>[15-16]</sup>。因此,可以根据故障时分相辨识的电容值的差异大小来实现瞬时性与永久性故障的判别,具体判别式如式(9)。

$$\begin{cases} \Delta C_a = \frac{|C_a(i)' - C_r|}{C_r} < \lambda \\ \Delta C_b = \frac{|C_b(i)' - C_r|}{C_r} < \lambda \\ \Delta C_c = \frac{|C_c(i)' - C_r|}{C_r} < \lambda \end{cases} \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

式中:  $\lambda$  值为识别偏差阈值;  $C_a(i)'$ ,  $C_b(i)'$  和  $C_c(i)'$  分别为分相相间电容计算值;  $\Delta C_a$ ,  $\Delta C_b$  和  $\Delta C_c$  分别为三相相间电容相对于实际值的识别偏差值,  $C_r$  为线路间互电容的实际值,  $C_r$  的计算公式如式(10)。

$$C_r = \frac{(C_1 - C_0)L}{3} \quad (10)$$

式中:  $C_1$  和  $C_0$  分别为线路单位长度的正序电容和零序电容;  $L$  为线路长度。考虑计算模型与实际故障模型存在一定的误差,设定阈值为 0.1~0.2,若式(9)中三个判别式连续 10 个采样点计算数值同时成立,即可判定为瞬时性故障,判断周期为三个周期。若采样频率为 2000 Hz,即 31 个采样点(15.5 ms)就可判断出是否为永久性故障。

### 3 仿真实验

以新疆某光伏示范工程接入配网为例,在 PSCAD 中建立动态仿真模型,在 Matlab 中编写永久性故障判别程序,以 .M 的形式嵌入 PSCAD,实现 PSCAD 和 Matlab 联合仿真,仿真系统如图 6 所示。

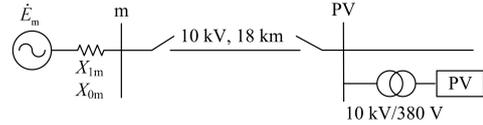


图 6 光伏接入配网仿真实例图

Fig. 6 Simulation example diagram of photovoltaic access distribution network

图 6 中线路长 18 km,  $X_{lm}=9.6 \Omega$ ,  $X_{0m}=8.7 \Omega$ , 线路参数如下:  $R_1=0.195 \times 10^{-4} \Omega/m$ ,  $R_0=0.1675 \times 10^{-3} \Omega/m$ ,  $X_{L1}=0.2868 \times 10^{-3} \Omega/m$ ,  $X_{L0}=0.8537 \times 10^{-3} \Omega/m$ ,  $X_{C1}=227.48 \times 10^6 \Omega \cdot m$ ,  $X_{C0}=381.86 \times 10^6 \Omega \cdot m$ , 线路对地电容实际值  $C_{0r}=1.5012 \times 10^{-7} F$ , 根据式(10)相间电容实际值  $X_{C_r}=3.4 \times 10^{-8} F$ 。光伏输出功率 4 M, 采用恒功率控制,以单位功率因数并网,逆变器输出电压 380 V,  $\lambda$  取值为 0.15。

设定故障发生在线路中点处,故障为 AB 相间金属性接地故障,采样周期为 0.0005 s,故障发生在 29 ms,经过 100 ms 系统电源断路器断开,再经过 625 ms 光伏低电压穿越失败并脱网。识别程序从

采样点 1701 开始计算(对应时间点为 0.8505 s), 故障相和非故障相在瞬时性故障时识别的相间电容  $C_m$  值如图 7 所示。

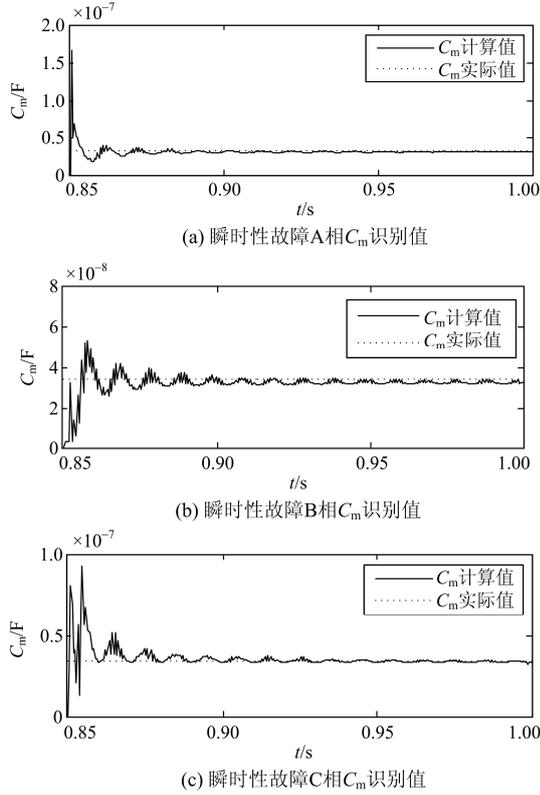


图 7 AB 相瞬时性接地故障  $C_m$  识别值

Fig. 7  $C_m$  recognition value in AB phase instantaneity grounding fault

由图 7 可以看出, 在线路 AB 相发生瞬时性接地故障时, 计算模型与实际模型相吻合, 在光伏 LVRT 失败并且二次电弧熄灭后,  $C_m$  的识别值与实际值非常接近, 在第二个判别周期内  $C_m$  的计算值即满足判别式(9), 即正确判断出故障类型。

仿真参数同上, AB 相发生永久性接地故障, 故障相和非故障相在永久性故障时识别的相间电容  $C_m$  值如图 8 所示。

分析图 8 可知, 在发生永久性故障时, 计算模型与实际线路模型不相符, 此时无论是故障相还是非故障相识别的  $C_m$  与实际值相差较大。虽然 B 相的  $C_m$  的识别值与实际值接近, 但分析具体数值, 此时  $C_m$  的识别值为  $4.14e^{-8}$  F, 将此值带入式(9), 可得  $\Delta C_b=0.2176$ , 远远大于设定的判别阈值 0.15。为验证发生相间故障识别模型的正确性和可靠性, 设定在线路中点处分别发生三相瞬时性故障和永久性故障, 故障发生时刻、持续时间同上, 线路识别参数  $C_m$  值如图 9 所示。

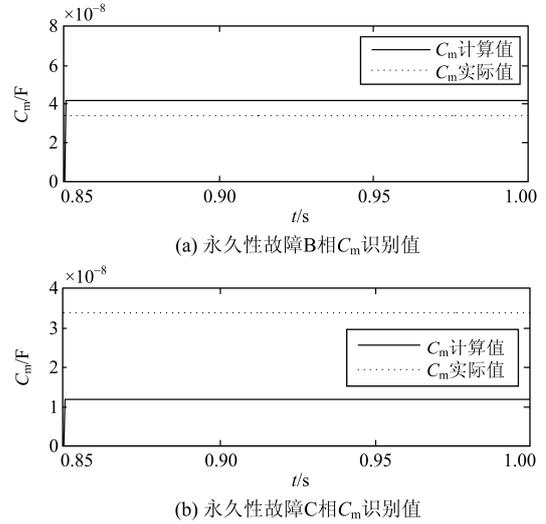


图 8 AB 相发生永久性接地故障  $C_m$  识别值

Fig. 8  $C_m$  recognition value in AB phase permanent ground fault

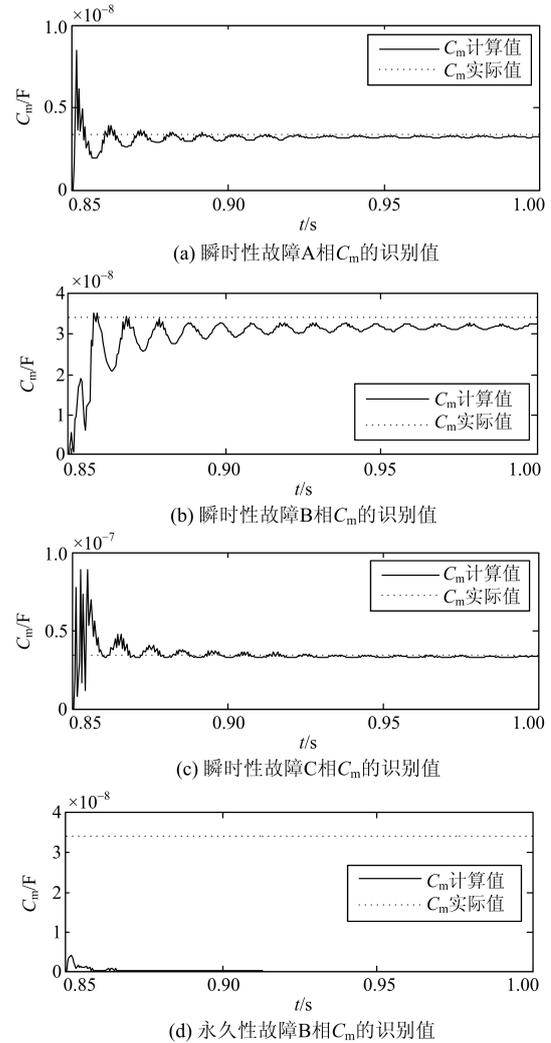


图 9 ABC 三相故障  $C_m$  的识别结果

Fig. 9  $C_m$  recognition results when ABC three-phase fault

由图 9 的仿真结果可知, 在线路中点处发生三相瞬时性短路故障时,  $C_m$  的识别值均与实际值非常接近, 将其值代入判别式(9), 均能正确判别为瞬时性故障, 图 9(d)为发生三相永久性短路故障 B 相  $C_m$  的识别值, 由于计算模型与实际模型之间的不一致, 所以计算值与实际值差异明显, 具有良好的辨识度。

为了验证所提判别方法具有良好的适应性, 根据故障发生的性质、类型、地点等状况进行了大量的仿真计算, 具体数据如表 1 和表 2, 表中的  $C_m$  均为第二个判别周期的识别值, 根据瞬时性故障与永久性故障仿真识别值误差大小, 同时在保证有一定判别裕度的基础上, 本例判别式阈值  $\lambda$  取 0.15。

表 1 相间故障  $C_m$  的识别值( $\times 10^{-8}F$ )

Table 1 Identification of  $C_m(\times 10^{-8}F)$  when phase to phase fault

故障位置/km	故障类型	过渡电阻/ $\Omega$	瞬时性故障			永久性故障		
			A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
0.5	AB	0.1	3.42	3.11	3.32	4.04	9.98	0.14
9	AB	10	3.38	3.04	3.25	4.01	10.1	0.15
16	AB	50	3.33	3.07	3.21	4.03	10.2	0.15
0.5	ABC	0.1	3.26	3.21	3.33	5.01	0.08	0.07
9	ABC	10	3.29	3.15	3.25	5.04	0.08	0.06
16	ABC	50	3.26	3.17	3.21	5.04	0.08	0.06

表 2 接地故障  $C_m$  的识别值( $\times 10^{-8}F$ )

Table 2 Identification of  $C_m(\times 10^{-8}F)$  when grounding fault

故障位置/km	故障类型	过渡电阻/ $\Omega$	瞬时性故障			永久性故障		
			A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
0.5	ABG	0.1	3.37	3.05	3.21	1.01	4.158	1.17
9	ABG	10	3.38	3.04	3.25	1.01	4.14	1.17
16	ABG	50	3.33	3.07	3.244	0.98	4.13	1.18
0.5	AG	0.1	3.32	3.27	3.23	2.92	1.35	0.78
9	BG	10	3.26	3.32	3.24	1.52	0.08	3.24
16	CG	50	3.24	3.21	3.23	3.25	0.13	0.16

分析表 1 与表 2 中的数据可知, 该判别方法基本不受故障位置与过渡电阻的影响, 具有良好的辨识度。在两相短路和两相接地短路瞬时性故障时, 相对其他短路类型识别值, B 相的  $\Delta C_b$  相对较大为 0.105, 但也满足小于 0.15 判别要求。在发生永久性故障时,  $C_m$  均具有良好的辨识度, 数值差异明显, 识别程序在两个判别周期内均能正确判断出故障类型。

## 4 结论

在 PSCAD 中, 建立了具备 LVRT 能力的光伏接入配网动态模型, 分析了光伏接入配网对前加速重合闸的影响, 提出基于相间电容参数识别的三相

重合闸永久性故障判别方法, 根据研究内容得出如下结论:

1) 该方法仅利用保护两端的电压量和电流量, 识别精度高, 速度快, 所建立的线模分量模型不仅能够反映相间故障, 而且能够正确反映接地故障, 具有良好的适应性。

2) 在线路发生瞬时性故障时, 在重合过程中, 前加速自动重合闸应具备检无压和检同期能力, 否则光伏出口电压会出现二次跌落, 光伏逆变器将出现遭受电流二次冲击问题, 可能会损坏逆变设备。

3) 该方法无需对故障信号进行滤波, 受谐波分量的影响小, 基本不受故障位置、过渡电阻的影响, 能够很好地解决光伏接入配网重合于永久性故障的问题, 具有较强的适应性。

4) 本方法适用的前提是光伏优先执行 LVRT, 不执行孤岛检测程序, 适用于典型光伏接入配网的故障判别, 对于光伏接入更为复杂配网的永久性故障判别还有待进一步的研究。

## 参考文献

- [1] 梁振锋, 索南加乐, 宋国兵, 等. 输电线路自适应重合闸研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 140-147.  
LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Research review of adaptive reclosure in transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 140-147.
- [2] 眭肖钰, 赵宏. 带并联电抗器输电线路永久性故障判别的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(18): 43-46.  
SUI Xiaoyu, ZHAO Hong. Study on identification of permanent fault for transmission lines with shunt reactors[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(18): 43-46.
- [3] 索南加乐, 梁振锋, 宋国兵. 自适应熄弧时刻的单相重合闸的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 37-41.  
SUONAN Jiale, LIANG Zhenfeng, SONG Guobing. Study of single-phase reclosure with adaptive secondary arc extinction[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 37-41.
- [4] 张海玉, 刘闯, 晁勤, 等. 具有 LVRT 能力的并网光伏系统继电保护问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 53-60.  
ZHANG Haiyu, LIU Chuang, CHAO Qin, et al. Research on relay protection issues of grid-connected photovoltaic system with LVRT ability[J]. Power System Protection

- and Control, 2015, 43(3): 53-60.
- [5] 任志玲, 张媛媛. 基于改进的 HHT 变换和信心度的配电网故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 8-13.  
REN Zhiling, ZHANG Yuanyuan. Fault line selection of distribution network based on improved Hilbert-Huang transform and identification confidence degree[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 8-13.
- [6] 商立群, 秦娜. 带并联电抗器同杆双回输电线路故障特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 17-20.  
SHANG Liqun, QIN Na. Study on the fault characteristic of the double circuit transmission lines with the shunt reactor[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 17-20.
- [7] 姜晨, 高亮. 基于负序功率方向比较与聚类算法的改进继电保护算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 92-98.  
JIANG Chen, GAO Liang. Study on an improved relaying protection method based on negative-sequence power direction comparison and cluster algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 92-98.
- [8] 陈诚, 江亚群, 黄纯. 输电线路单相瞬时性故障熄弧判定方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(11): 21-25.  
CHEN Cheng, JIANG Yaqun, HUANG Chun. An approach to judge extinction arc of single-phase transient fault in transmission lines[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(11): 21-25.
- [9] HUANG Junhui, GE Shaoyun, HAN Jun, et al. A diagnostic method for distribution networks based on power supply safety standards[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.  
DOI 10.1186/s 41601-016-0020-2
- [10] 李育强, 王志文, 王维庆, 等. 具备 LVRT 能力的光伏接入配网对重合闸的影响及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 61-67.  
LI Yuqiang, WANG Zhiwen, WANG Weiqing, et al. Influence of PV with LVRT capability access to distribution network on automatic reclosing and its countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 61-67.
- [11] 廖志刚, 何世恩, 董新洲, 等. 提高大规模风电接纳及送出的系统保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 41-46.  
LIAO Zhigang, HE Shien, DONG Xinzhou, et al. Research on the system protection for enhancing the accommodation and transmission of large scale wind power[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 41-46.
- [12] 金恩淑, 汪有成, 陈喜峰. 基于分区域广域继电保护系统的故障识别算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 68-73.  
JIN Enshu, WANG Youcheng, CHEN Xifeng. Fault identification algorithm based on zone-division wide area protection system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 68-73.
- [13] 吴浩, 李群湛, 夏焰坤, 等. 基于概率神经网络的广域后备保护故障判别研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 43-49.  
WU Hao, LI Qunzhan, XIA Yankun, et al. Fault identification for wide area backup protection based on probabilistic neural network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 43-49.
- [14] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 115-123.  
YAO Haiyan, ZHANG Jing, LIU Yi, et al. Method of cable incipient faults detection and identification based on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 115-123.
- [15] 邵文权, 加玛力汗, 宋国兵, 等. 基于电容参数识别的永久性故障判别方法[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(6): 708-712.  
SHAO Wenquan, JIAMA Lihan, SONG Guobing, et al. Permanent fault identification method based on capacitance parameter[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(6): 708-712.
- [16] 梁振锋, 索南加乐, 宋国兵, 等. 基于模量电容参数识别的永久性故障判别方法[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 916-922.  
LIANG Zhenfeng, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Permanent faults identification method for three-phase autoreclosing based on capacitance parameter[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 916-922.

收稿日期: 2016-08-16; 修回日期: 2016-10-14

作者简介:

李育强(1977—), 男, 博士, 通信作者, 主要从事光伏并网及继电保护研究; E-mail: 835556737@qq.com

宋国兵(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为交、直流输电系统继电保护研究;

王维庆(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统微机保护与控制、风力发电控制技术。

(编辑 张爱琴)