

基于综合阻抗的母线保护新原理

索南加乐¹, 邓旭阳¹, 阿里木江·卡德尔², 李瑞生³

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;
3. 许继电气有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 利用故障时母线上的电压相量与母线上所连各支路电流相量之和的比值, 来判断母线的内、外部故障。在母线外部发生故障时, 该比值反映的是母线的容抗, 其幅值很大, 且其相角接近 -90° ; 内部故障时, 该比值反映的是母线故障时的过渡电阻, 其幅值相对较小, 且相角接近 0° 。据此可以区分母线的内、外部故障。新原理判据在母线内、外部故障时不仅具有很好的反差特性, 而且有较强的抗电流互感器(CT)饱和能力, 其动作的灵敏度和可靠性不受母线高阻接地以及多角形接线或3/2断路器接线的母线内部故障有汲出电流时的影响, 而且原理简单、易整定。EMTP仿真验证了新原理的有效性和可行性。

关键词: 母线保护; 综合阻抗; CT饱和; 3/2断路器接线; 汲出电流

A novel principle of integrated impedance based bus-bar protection

SUONAN Jia-le¹, DENG Xu-yang¹, ALIMJIAN Kader², LI Rui-sheng³

(1. School of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Electric Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3. XJ Electric Co. Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: The principle uses the ratio of the voltage phasor of the bus-bar to the branch current phasor sum to detect internal faults and external faults, which is defined as the integrated impedance in this paper. The integrated impedance of an external fault reflects the capacitance impedance of the bus-bar, its amplitude is large and the phase angle is close to -90° , while the integrated impedance of an internal fault is the fault resistance, its amplitude is comparatively small and the phase angle is close to 0° . As a result, the magnitudes and arguments of the integrated impedances are quite different between an external and an internal fault. According to such a characteristic, the criterion of fault detection is put forward, which has the inherent immunity to the impact of current flowing out when a fault occurs in the protection zone of the polygon connection or breaker-and-a-half bus-bar and the effect of the CT saturation on the proposed principle is discussed. EMTP simulation results verify the sensitivity and reliability of the proposed principle.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50677051 and No.50877061).

Key words: bus-bar protection; integrated impedance; CT saturation; breaker-and-a-half configuration; out-flowing current

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0001-07

0 引言

发电厂和变电站的母线是电力系统中最重要电气设备之一, 在母线上连接着发电机, 变压器, 输电线路, 配电线路等设备, 母线工作的可靠性将直接影响着发电厂和变电站工作的可靠性。与输电线路故障相比, 母线故障的机率较小, 但造成的后

果却十分严重, 若不及时切除, 甚至可能造成整个电力系统瓦解, 且其电压等级越高, 故障造成的危害也越大。因此, 随着电力系统规模的日益扩大, 电压等级的不断提高, 对母线保护的可靠性也提出了更高的要求^[1-2]。

数字式母线保护按最为通用的原理可分为两种: 电流差动式原理和电流相位比较式原理。电流差动式原理整定时受母线运行方式的影响较大, 使得保护在满足选择性和灵敏度上发生困难。在高压和超高压系统中广泛采用的3/2断路器接线甚至接

基金项目: 国家自然科学基金项目(50677051, 50877061);
教育部博士点基金(20070698057)

有平行短线路的双母线方式中，母线发生区内故障伴有汲出电流的情况多有发生，此时对于电流比相式保护，将会发生拒动，而电流差动式保护的灵敏度会下降，严重时也可能拒动^[3-5]。除此之外，两种原理的保护抗电流互感器（CT）饱和能力都有限，母线区外故障 CT 饱和时往往会造成保护误动^[6-7]。文献[8-9]提出了一种新型的分布式微机母线保护原理，该原理利用计算机网络连接分散到各回路上的保护单元，极大地提高了母线保护的可靠性，但在判据上还是沿用了电流差动式原理。文献[10-14]则提出基于暂态行波的母线保护原理，通过比较母线内、外部故障时行波的极性或者大小关系来判别母线的区内外故障；文献[15]还提出了基于神经网络模型的母线保护。然而这些基于暂态量或神经网络模型的母线保护在可靠性上尚存在不足。综上所述，进一步探索和研究新的母线保护方案和原理势在必行。

当母线外部发生故障时，流经母线的差动电流全部反映为母线的接地电容电流，母线上的电压相量与各支路电流相量之和的比值反映母线的容抗，其幅值很大，且相角接近 -90° 。内部故障时，该比值反映的是母线故障时的过渡电阻，其幅值相对较小，且相角接近 0° 。因此，根据故障时的母线电压相量与各支路电流相量之和的比值，可以区分母线的内部和外部故障，据此本文提出了基于综合阻抗的母线保护新原理。该原理具有较强的抗 CT 饱和能力，其保护动作的灵敏度和可靠性不受母线高阻接地以及多角形接线或 3/2 断路器接线的母线内部故障有汲出电流时的影响，而且原理简单、易整定，EMTP 仿真验证了新原理的有效性和可行性。

1 基于综合阻抗的母线保护原理

下面以图 1 所示的单相单母线模型为例，来说明基于综合阻抗的母线保护原理。

1.1 母线综合阻抗的概念

对于母线 M，假设它有两条进线，两条出线，电流以母线流向线路的方向为正。正常运行时如图 1 所示。

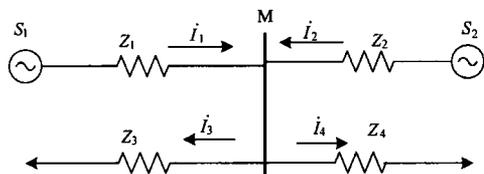


图 1 母线正常运行状态

Fig.1 Circuit configuration of a bus-bar

$Z_1、Z_2、Z_3、Z_4$ 分别为母线上各条支路的阻抗。若母线上 F 点发生故障，则其故障状态如图 2 所示。

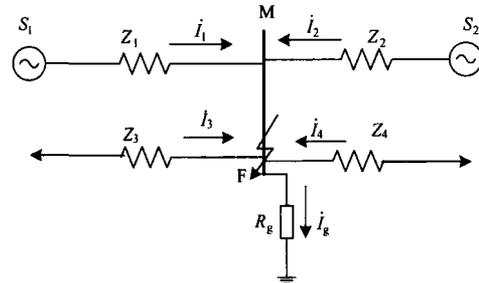


图 2 母线内部故障

Fig.2 Network of internal fault

\dot{U} 为母线上 F 点的电压相量， $i_1、i_2、i_3、i_4$ 分别为各条支路上的电流相量， i_g 为流经过渡电阻 R_g 的电流。定义综合阻抗为：

$$Z_{cd} = \frac{\dot{U}}{\dot{i}_{cd}} \quad (1)$$

其中： \dot{U} 为母线电压； $i_{cd} = i_1 + i_2 + i_3 + i_4$ ，为母线差流。若母线上有 n 条支路，则 $i_{cd} = \sum_{i=1}^n i_i = i_\Sigma$ 。

下面分析母线上发生内部、外部故障时，综合阻抗的特点。

1.2 母线内部故障时的综合阻抗

由图 2 可知，当母线内部发生故障时，母线差流就等于流入过渡电阻 R_g 的电流 i_g ，即 $i_{cd} = i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = i_\Sigma = i_g$ 。

根据式(1)可知，此时的综合阻抗为：

$$Z_{cd} = \dot{U} / i_{cd} = \dot{U} / i_g = R_g \quad (2)$$

$$\arg Z_{cd} = \arg R_g = 0^\circ \quad (3)$$

可见，母线内部发生故障时综合阻抗 Z_{cd} 为母线故障时的过渡电阻，其模值相对较小，且阻抗角接近 0° 。

1.3 母线外部故障时的综合阻抗

当母线外部发生故障时，流过母线的差流 i_{cd} 全部反映为母线的对地电容电流 i_c ，如图 3 所示。

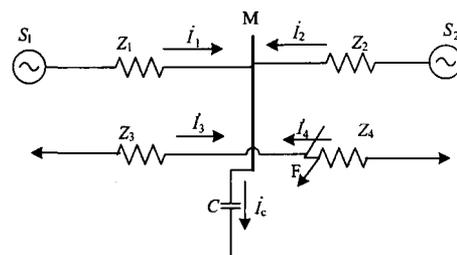


图 3 母线外部故障

Fig.3 Network of external fault

此时 $i_{cd} = i_{\Sigma} = i_c$, 由于母线上的电压相量为 \dot{U} , 可见, 母线外部故障时综合阻抗为:

$$Z_{cd} = \dot{U} / i_{cd} = \dot{U} / i_c = Z_c \quad (4)$$

$$\arg Z_{cd} = \arg Z_c = -90^\circ \quad (5)$$

其中, Z_c 为母线对地电容的容抗。因此, 母线外部发生故障时, Z_{cd} 其模值与母线的容抗 Z_c 模值相等, 与内部故障时的过渡电阻相比, 它是一个很大的数值, 且其阻抗角约为 -90° 。

2 基于综合阻抗的母线保护判据

2.1 保护动作判据

通过以上分析可知, 当母线外部发生故障时, 综合阻抗的幅值 $|Z_{cd}|$ 在理论上等于 $|Z_c|$, 其阻抗角约为 -90° 。当母线发生内部故障时, 故障相的综合阻抗幅值 $|Z_{cd}|$ 大小等于母线的过渡电阻, 远小于 $|Z_c|$, 且其阻抗角约为 0° 。因此可以根据 Z_{cd} 的大小及其相角来区分母线的内部、外部故障。由于上述分析均是建立在母线电压的大小能够满足计算综合阻抗幅值和相角时的灵敏度要求的基础之上。当母线电压很小时, 其方向性不明确, 此时无法准确计算综合阻抗的相角。因此, 需要设置一个电压启动判据。据此提出了基于综合阻抗的母线保护新原理, 判据如下:

差流启动判据:

$$|i_{cd}| > 1.25 I_T + I_{set} \quad (6)$$

电压启动判据:

$$|\dot{U}_\varphi| > k_{rel} U_N \quad (7)$$

幅值判据:

$$|Z_{cd}| < Z_{set} \quad (8)$$

相角判据:

$$-\theta < \arg Z_{cd} < \theta \quad (9)$$

I_T 为浮动门槛, 随着变化量输出增大而逐步自动提高, 取 1.25 倍可保证门槛电流始终略高于不平衡输出, 提高安全性, 减少不必要的频繁启动, 且具有较高的灵敏度。 I_{set} 为电流定值, 只需要保证计算精度即可, 不需要躲开正常运行及外部故障时的最大不平衡电流, 一般可以固定取为 0.1 A (二次值), 已足以保证计算精度。

电压启动判据中, U_N 为母线额定电压的大小, k_{rel} 为可靠系数, 通常取为 0.05。

幅值判据中 Z_{set} 为阻抗定值。由于母线高阻接地时的过渡电阻一般在 50~100 Ω , 因此在整定时取: $Z_{set} = 500 \Omega$, 已足以保证母线外部故障时不动作, 而母线内部故障时, 仍会有较高的灵敏度。

相位判据中 θ 为考虑各种误差后的裕度角, 可取 $\theta = 20^\circ$, 已能保证足够的灵敏度和可靠性。

2.2 保护动作的逻辑框图

为了提高保护动作的可靠性, 使得母线保护在各种故障情况下都能够正确动作, 因此, 将以上综合阻抗幅值判据和相角判据通过或门控制输出, 只要满足任意一个判据, 保护就会动作于跳闸, 其动作逻辑图如图 4 所示。

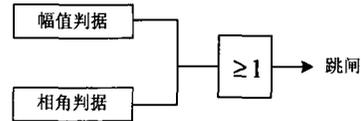


图 4 保护动作的逻辑框图

Fig.4 Logical program of protection

3 性能分析

3.1 新原理判据具有较强的抗 CT 饱和能力

对于采用比率制动原理的母线保护, 若母线上有 M 条支路, 则差流和制动电流关系表示如下:

$$I_d = \left| \sum_{j=1}^M i_j \right|, \quad I_r = \sum_{j=1}^M |i_j|, \quad I_d \geq k I_r$$

其中 k 为比率制动系数, 在整定时既要躲过外部故障时的最大不平衡电流, 以满足可靠性要求; 又要保证母线内部故障时保护的灵敏度, 因此制动系数 k 的取值较难把握。若取值较小, 则当母线发生外部故障且故障支路 CT 饱和时, 产生的差流极易使母线保护发生误动。

基于新原理的母线保护判据则具有较强的抗 CT 饱和能力。当母线外部故障 CT 饱和时, 若 CT 的饱和程度较轻, 则此时产生的差流较小, 计算得到的综合阻抗依然较大, 不满足幅值判据, 随着 CR 饱和程度的加深, Z_{cd} 才逐渐向动作区靠拢。由于实际中母线发生高阻接地的几率较小, 因此, 可根据现场的电压等级及实际情况, 来设置定值 Z_{set} , 因此, 当 Z_{set} 取值较低时, 使得新原理动作判据具有更强的抗 CT 饱和能力。由于母线外部故障 CT 饱和时的差流在数值上等于饱和 CT 的二次电流缺损部分, 这使得综合阻抗的相角会由于差流波形存在较大缺损而偏离 -90° , 但是由于内、外部故障时的综合阻抗相角具有较大反差, 裕度范围可接近 90° , 使得此时的综合阻抗相角也较难满足相角判据, 因而, 保护具有较强的抗 CT 饱和能力。

当母线发生内部故障时, 各支路仅流过其自身线路电流, 因此短路容量不会很大, CT 可能由于铁芯剩磁以及非周期分量等原因出现轻微饱和情况, 严重饱和情况一般不会发生。而且, 此时的母线差流为所有支路的电流之和, 尽管某一 CT 饱和

支路的二次电流波形有一定程度的缺损，但是对整个差流波形的影响不大，差流幅值变化也较小，综合阻抗的幅值变化不大，能够满足幅值判据的动作要求，大量的仿真结果也证实了这一点。而由于差流波形变化不严重，此时的综合阻抗的相位值也始终接近 0° ，能够很好地满足相位判据，因此，此时保护动作的可靠性丝毫不受影响。

3.2 保护性能不受多角形接线或 3/2 断路器接线的母线内部故障有汲出电流的影响

图 5 为 3/2 断路器接线的母线示意图。当母线 1 内部 F_1 处发生故障，若此时有短路电流流出母线 1，如图 5 所示。这种情况会使比较母线连接元件电流相位原理的母线保护拒动，由于穿越性电流的影响，也会使具有制动特性原理的母线差动保护的制动电流增大而造成保护的灵敏度降低。对于基于综合阻抗的母线保护新原理而言，由于保护在计算的过程中只与母线的差电流有关，而此时差电流不受穿越性电流的影响，因此内部故障时保护的灵敏度不会受到任何影响。

由此可见，对于多角形接线或 3/2 断路器接线时的母线内部故障有汲出电流的情况，基于新原理的母线保护性能根本不会受到影响，保护依然可准确灵敏地区分母线的内、外部故障。

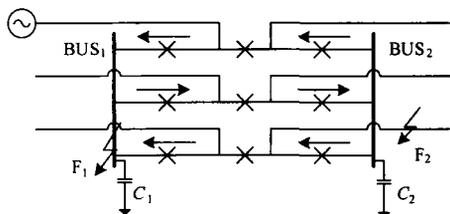


图 5 3/2 断路器接线的母线示意图

Fig.5 Circuit configuration of a break-and-a-half bus

3.3 母线内部经高阻接地时仍具有较高的灵敏度

对于比率制动原理的母线保护而言，当母线内部发生高阻接地故障时，可能导致其具有较小的动作电流。若此时母线上所连支路较多，则其制动电流也会比较大，且支路数越多，制动电流越大。因此，母线保护的灵敏度会下降，严重时可能造成保护拒动。

而基于综合阻抗的母线保护新原理在计算综合阻抗时与制动电流的大小无关，且母线内部经高阻接地故障时，即使差流较小，但计算出的综合阻抗始终是过渡电阻。由于母线高阻接地时的过渡电阻一般在 $50\sim 100\Omega$ ，因此，在整定时取： $Z_{set} = 500\Omega$ ，已足以保证母线内部故障时具有较高的灵敏度。并

且此时综合阻抗的相角也始终接近 0° ，故障特征非常明确，因此，母线内部高阻接地时，保护动作的灵敏度和可靠性不会受到影响。

4 仿真实验

4.1 EMTP 仿真模型

为验证本文算法，利用 EMTP 建立如图 6 所示的 500 kV 的仿真系统。 S_1 端系统参数： $Z_{S1} = 1 + j45.149\Omega$ ， $Z_{S0} = 2 + j23.321\Omega$ ； S_2 端系统参数与 S_1 端系统参数相同。 M_1 端系统参数： $Z_{M1} = 300 + j500\Omega$ ； M_2 端系统参数与 M_1 端系统参数相同。线路长度为 100 km，其参数为： $R_0 = 0.1957\Omega/\text{km}$ ， $\omega l_0 = 0.6945\Omega/\text{km}$ ， $\omega c_0 = 0.02003\Omega/\text{km}$ ； $R_1 = 0.0270\Omega/\text{km}$ ， $\omega l_1 = 0.3028\Omega/\text{km}$ ， $\omega c_1 = 0.01419\Omega/\text{km}$ 。母线电容 $C = 15000\text{pF}$ 。

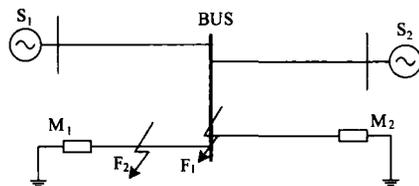


图 6 500 kV 母线保护仿真系统

Fig.6 Simulation model of 500 kV power system

利用上述模型进行仿真，采样频率为 2 kHz，仿真中采用 20 ms 数据窗计算相量。

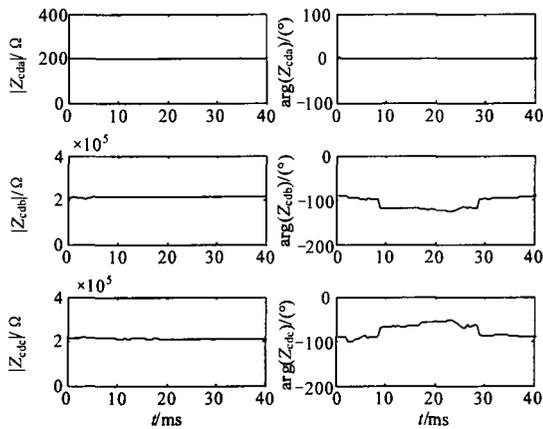
4.2 母线内、外部故障时的仿真结果

分别在母线上 F_1 处以及线路上 F_2 处仿真母线的内部和外部故障，计算得出各种故障情况下的故障分量综合阻抗。

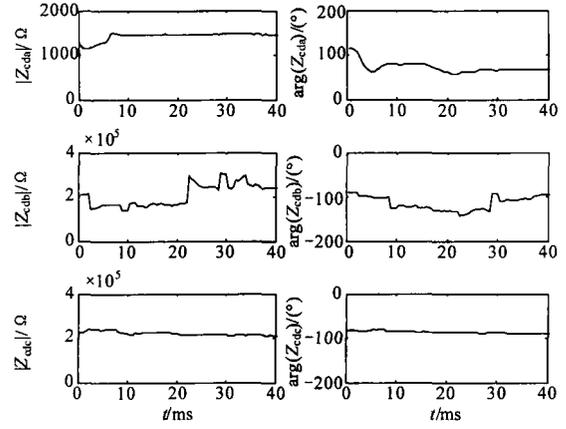
1) 由图 7 (a) 可见，当母线内部发生经过渡电阻短路接地故障时，故障相的综合阻抗幅值最小，与过渡电阻的大小相等，且其相角约为 0° ；非故障相的综合阻抗幅值都很大，远远大于故障相的综合阻抗，且其阻抗角都接近 -90° 。动作判据具有明确的选择性，保护能够灵敏可靠地动作。

2) 由图 7 (b) 可知，当母线外部发生经过渡电阻短路接地故障时，三者的综合阻抗幅值都很大，达到了上万欧姆，且各相的阻抗角都接近 -90° ，与图 7 (a) 中的仿真结果相比具有明显的差别，保护动作灵敏度较高。可见，使用综合阻抗的幅值判据和相角判据可以容易地区分母线的内部、外部故障。

3) 由上面的仿真结果可见，对于本文新原理判据中的综合阻抗定值 Z_{set} 很容易选取，利用综合阻抗来构成母线保护具有较高的可靠性和安全性。



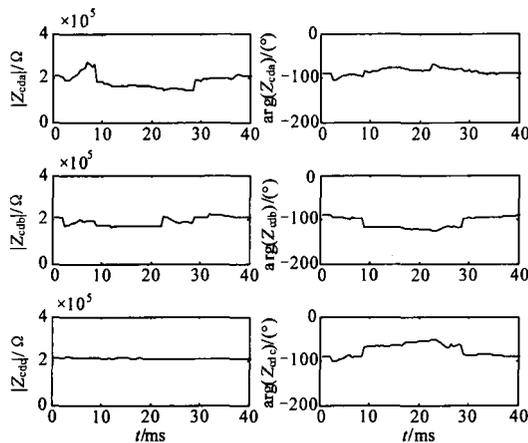
(a) 母线内部A相接地故障 $R_f=200\ \Omega$



(b) 综合阻抗的计算结果

图8 母线外部A相接地故障CT饱和时的仿真结果

Fig.8 Simulation results of external AG fault with CT saturation



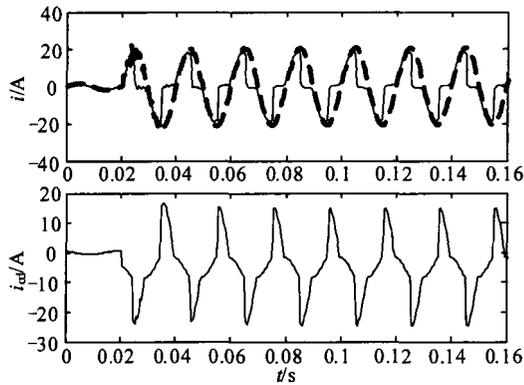
(b) 母线外部A相接地故障 $R_f=200\ \Omega$

图7 母线内、外部故障仿真结果

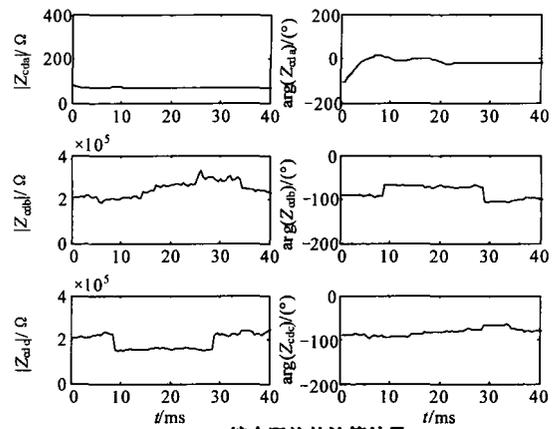
Fig.7 Simulation results of internal fault and external fault

4.3 母线内、外部故障 CT 饱和时的仿真结果

利用 EMTP 中的 Type98 非线性电感元件搭建 CT 模型来模拟 CT 饱和, 分别对母线外部故障和内部故障 CT 饱和时的综合阻抗进行计算, 仿真结果如图 8, 9。



(a) 饱和CT的电流波形及差流波形



(b) 综合阻抗的计算结果

图9 母线内部A相接地故障CT饱和时的仿真结果

Fig.9 Simulation results of internal AG fault with CT light saturation

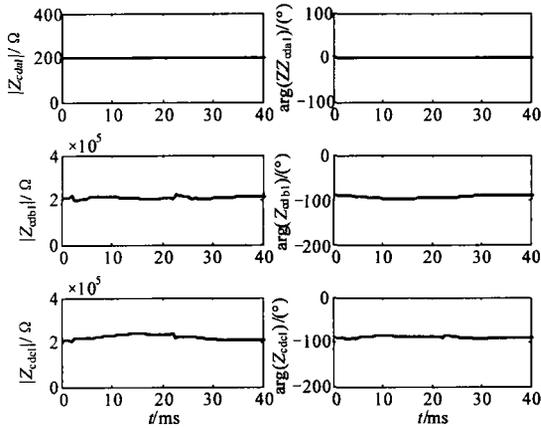
1) 图8为母线外部接地故障伴有CT饱和时的仿真结果, 可以看出, 此时的母线由于CT饱和存在较大的差流, 这使得故障相的综合阻抗幅值有所下降, 但其值仍然接近1000, 不满足幅值判据。同时, 由于差流波形存在缺损和畸变, 使得综合阻抗的相角发生变化, 偏离了原来的 -90° , 但仍然不满

足相角判据, 因而保护不会发生误动。

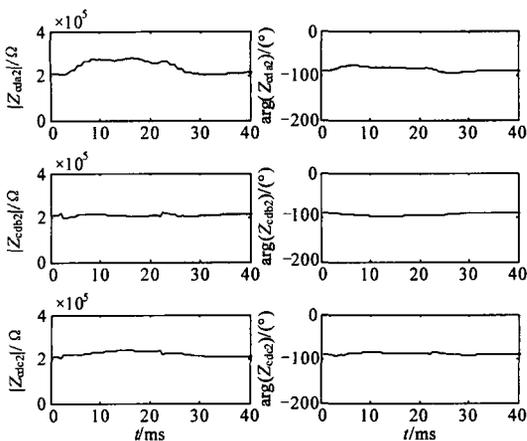
2) 图 9 为母线内部故障伴有 CT 饱和发生时的仿真结果, 可以看出虽然饱和支路的二次电流波形有一定程度的缺损, 但是对整个差流波形的影响不大, 差流幅值变化也较小, 此时计算出的综合阻抗幅值同过渡电阻的大小相差不大, 满足幅值判据; 同样地, 其相角也没有发生较大偏移, 依然接近 0° , 满足相角判据, 因而保护能够可靠、迅速动作。

5 3/2 断路器接线的母线内外部故障时的仿真验证 (图 10, 11)

为了充分验证本文算法的有效性, 利用 EMTP 建立如图 5 所示的 500 kV 系统的 3/2 断路器接线母线仿真模型。图中 F_1 、 F_2 分别为母线内、外部的两个故障点。内部故障时在故障点加一个较大的过渡电阻, 并在中间支路中接小电阻, 确保内部故障时如图中箭头所示有短路电流流出母线。



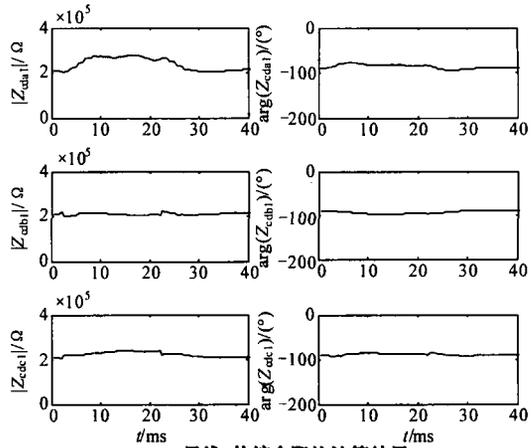
(a) 母线1的综合阻抗计算结果



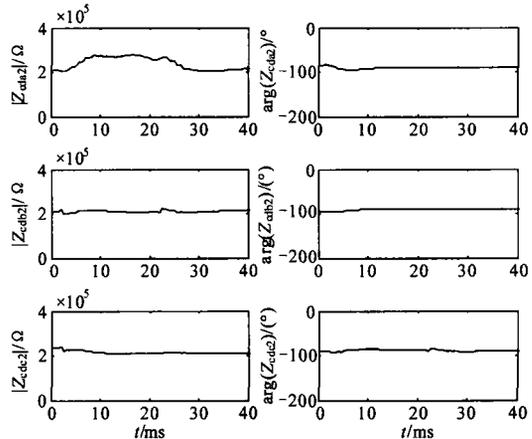
(b) 母线2的综合阻抗计算结果

图 10 母线 1 内部 A 相接地故障时的仿真结果 ($R_g = 200 \Omega$)

Fig.10 Simulation results of internal AG fault on bus 1



(a) 母线1的综合阻抗计算结果



(b) 母线2的综合阻抗计算结果

图 11 母线外部 A 相接地故障时的仿真结果

Fig.11 Simulation results of external AG fault of breaker-and-a-half bus

其中 Z_{cda1} 、 Z_{cdb1} 、 Z_{cdc1} 为母线 1 的综合阻抗;

Z_{cda2} 、 Z_{cdb2} 、 Z_{cdc2} 为母线 2 的综合阻抗。

由以上仿真结果可见, 母线内部故障时故障相的综合阻抗幅值很小, 大小等于过渡电阻, 其阻抗角接近 0° ; 而非故障相以及母线外部发生故障时三三相的综合阻抗幅值都很大, 可以达到上万欧姆, 其阻抗角都接近 -90° , 二者差别非常的明显。可见, 使用综合阻抗依然可以容易地区分 3/2 断路器接线的母线内部和外部故障, 即使内部故障时有电流流出母线, 动作灵敏度依然较高, 保护不会误动或拒动。

6 结论

本文提出了基于综合阻抗的母线保护新原理, 分析了母线内部和外部故障时综合阻抗的特征, 并利用 EMTP 对新原理进行了验证, 理论分析和仿真结果表明:

1) 新原理在母线内部故障时, 综合阻抗反映的

是母线的过渡电阻,而在母线外部故障时综合阻抗反映母线对地的容抗,二者的幅值大小以及相角都具有明显的差别,因此,保护判据具有很好的反差特性。

2) 综合利用了综合阻抗的幅值和相角特征的保护判据具有较强的抗 TA 饱和的能力,提高了母线保护的動作安全性。

3) 新原理判据在母线高阻接地时具有很高的灵敏度,而且当 3/2 断路器接线的母线内部故障有汲出电流时保护的動作灵敏度和可靠性也不受任何影响。

因此,可以考虑将其作为母线保护原理多重化配置的后备方案。

参考文献

- [1] 王春生,卓乐友,艾素兰. 母线保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 1987.
WANG Chun-sheng, ZHUO Le-you, AI Su-lan. Bus-bar protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1987.
- [2] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Power System Relay Protection[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1985.
- [3] 汪觉恒,唐卫华. 国内外各类母线保护技术特性分析[J]. 电力自动化设备, 2000, 20 (1): 43-45.
WANG Jue-heng, TANG Wei-hua. Analysis of various bus-bar protection's technical characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20 (1): 43-45.
- [4] 宋方方,王增平,刘颖. 母线保护的现状及发展趋势[J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (7): 66-69.
SONG Fang-fang, WANG Zeng-ping, LIU Ying. Status quo and development tendency of busbar protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23 (7): 66-69.
- [5] 尹其云. 对当前继电保护运行方面几个问题的分析[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (3): 1-3.
YIN Qi-yun. Analysis of several typical problems in protective relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (3): 1-3.
- [6] Fernandez C. An impedance-based CT saturation detection algorithm for bus-bar differential protection[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16 (10): 468-472.
- [7] Sachedv Mohindar S, Sidhu Tarlochan S, Gill Harjeet Singh. A busbar protection technique and its performance during CT saturation and CT ratio-mismatch[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2000, 15 (3): 895-901.
- [8] He Jia-li, Luo Shan-shan, Wang Gang, et al. Implementation of a distributed digital bus protection system[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1997, 12 (4): 1445-1451.
- [9] 徐小龙,游大海,尹项根. 方向式母线保护的探讨和应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (22): 80-82.
XU Xiao-long, YOU Da-hai, YIN Xiang-gen. Application of communication-based directional busbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (22): 80-82.
- [10] 李海峰,王刚,丁宇,等. 超高速暂态方向母线保护的研究[J]. 继电器, 2003, 31 (6): 13-18.
LI Hai-feng, WANG Gang, DING Yu, et al. Study of transient based directional comparison ultra-high-speed bus protection[J]. Relay, 2003, 31 (6): 13-18.
- [11] 葛耀中,董杏丽,董新洲,等. 基于小波变换的电流行波母线保护的研究(一)原理与判据[J]. 电工技术学报, 2003, 18 (2): 95-98.
GE Yao-zhong, DONG Xing-li, DONG Xin-zhou, et al. A new busbar protection based on current traveling waves and wavelet transform (1) principle and criterion[J]. Transaction of China Electrotechnical society, 2003, 18 (2): 95-98.
- [12] 葛耀中,董杏丽,董新洲,等. 基于小波变换的电流行波母线保护的研究(二)保护方案与仿真验证[J]. 电工技术学报, 2003, 18 (3): 98-101.
GE Yao-zhong, DONG Xing-li, DONG Xin-zhou, et al. A new busbar protection based on current traveling waves and wavelet transform (2) scheme and simulation[J]. Transaction of China Electrotechnical society, 2003, 18 (3): 98-101.
- [13] 李海峰,王刚,李晓华. 基于暂态电流谱能量的母线保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (6): 51-54.
LI Hai-feng, WANG Gang, LI Xiao-hua. A novel busbar protection based on transient current spectrum energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (6): 51-54.
- [14] 段建东,张保会,陈坚. 电流行波差动式母线保护的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (9): 43-48.
DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, CHEN Jian. Study on the current traveling-wave differential bus protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (9): 43-48.
- [15] 罗建,李亚军,徐国禹,等. 基于神经网络模型的母线保护[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (11): 41-44.
LUO Jian, LI Ya-jun, XU Guo-yu, et al. Research of bus protection on ANN model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (11): 41-44.

收稿日期: 2009-10-20

作者简介:

索南加乐(1960-),男,教授,从事电力系统继电保护的学与科研工作;

邓旭阳(1983-),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: xjtu.dxy@stu.xjtu.edu.cn