

同塔四回输电线路的模量电流差动保护

张琦兵, 邵能灵

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 同塔四回输电线中, 电容电流对电流差动保护的影响较大, 电流差动保护在应用时需经相模变换在模量下对电容电流进行补偿, 然后经相模反变换到相量形成保护判据。选取不同的同塔四回线相模变换矩阵, 研究经相模变换后各模量对各种故障类型的不同反映特征。在此基础上, 提出了适合于同塔四回输电线路的基于模量的新型电流差动保护。此模量电流差动保护方案的电容电流补偿计算简单, 并且能实现单相接地的故障选相。利用 PSCAD/EMTDC 对新保护方案进行了大量的仿真验证, 证实了其选相及分相动作能力。

关键词: 电流差动保护; 模量电流; 差动保护; 同塔四回输电线; 电容电流补偿

Mode-current differential protection of quadruple-circuit transmission lines on the same tower

ZHANG Qi-bing, TAI Neng-ling

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The capacitance current has a notable influence on current differential protection in the quadruple-circuit transmission lines on the same tower. The capacitance current compensation for the current differential protection must compute in the mode by the phase-mode transformation for convenient, and then form the protection criterion using mode-phase transformation method. The mode current will reflect different fault types if the transformation matrices are different. Based on this principle, this paper presents a new mode-current differential protection for quadruple-circuit transmission line. The capacitance current compensation of this protection scheme is simple and can realize the fault phase selection of single-phase grounding. The phase selection and split-phase action capability of the proposed protection scheme is verified by PSCAD/EMTDC simulation.

Key words: current differential protection; mode-current; differential protection; quadruple-circuit transmission lines; capacitance current compensation

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0033-05

0 引言

超高压输电线路中, 分布电容电流是影响电流差动保护性能的主要因素^[1-2]。同塔四回输电线中, 线路增多, 分布电容电流加大, 分布电容电流对电流差动保护的影响更为显著^[3]。有效减小电容电流影响的方法是对电容电流进行补偿。由于相间分布电容的存在, 各种电容电流补偿方案皆利用相模变换到模量进行补偿, 再经相模反变换到相量形成保护判据^[3-7]。本文通过选取不同的同塔四回线相模变换矩阵, 利用经相模变换后各模量对故障类型的不同

反映形成模量电流差动保护。此模量电流差动保护可以在变换到模量进行电容电流补偿后直接形成保护判据, 计算简单, 并且能对单相接地故障实现选相。PSCAD/EMTDC 仿真表明此保护方案耐受过渡电阻的能力强, 动作速度快。

1 同塔四回线相模变换基本原理

如图 1 所示为同塔四回传输线模型, 线路的自阻抗为 Z_1 , Z_m 为相间互阻抗, 第 1 回线与第 2 回线以及第 3 回线与第 4 回线间的线间互阻抗记为 Z_p , Z_{q1} 、 Z_{q2} 分别为第 2, 3 回线及第 1, 4 回线、第 1, 3 回线及第 2, 4 回线间的互阻抗。对于如图 1 所示的同塔四回线结构, 网络方程如式 (1)。

$$[U_{mn}] = [Z][I_{mn}] \quad (1)$$

基金项目: 上海市曙光计划资助项目 (07SG11); 教育部新世纪优秀人才计划 (NCET-08-0356)

其中: $[U_{mn}] = [\dot{U}_{mn1A}, \dot{U}_{mn1B}, \dot{U}_{mn1C}, \dot{U}_{mn2A}, \dot{U}_{mn2B}, \dot{U}_{mn2C}, \dot{U}_{mn3A}, \dot{U}_{mn3B}, \dot{U}_{mn3C}, \dot{U}_{mn4A}, \dot{U}_{mn4B}, \dot{U}_{mn4C}]^T$ 表示线路两端的电压差向量; $[I_{mn}] = [\dot{i}_{1A}, \dot{i}_{1B}, \dot{i}_{1C}, \dot{i}_{2A}, \dot{i}_{2B}, \dot{i}_{2C}, \dot{i}_{3A}, \dot{i}_{3B}, \dot{i}_{3C}, \dot{i}_{4A}, \dot{i}_{4B}, \dot{i}_{4C}]^T$ 为线路电流向量。阻抗矩阵为:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_1 & Z_m & Z_m & Z_p & Z_p & Z_p & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} \\ Z_m & Z_1 & Z_m & Z_p & Z_p & Z_p & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} \\ Z_m & Z_m & Z_1 & Z_p & Z_p & Z_p & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} \\ Z_p & Z_p & Z_p & Z_1 & Z_m & Z_m & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} \\ Z_p & Z_p & Z_p & Z_m & Z_1 & Z_m & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} \\ Z_p & Z_p & Z_p & Z_m & Z_m & Z_1 & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} \\ Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_1 & Z_m & Z_m & Z_p & Z_p & Z_p \\ Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_m & Z_1 & Z_m & Z_p & Z_p & Z_p \\ Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_m & Z_m & Z_1 & Z_p & Z_p & Z_p \\ Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_p & Z_p & Z_p & Z_1 & Z_m & Z_m \\ Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_p & Z_p & Z_p & Z_m & Z_1 & Z_m \\ Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q2} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_{q1} & Z_p & Z_p & Z_p & Z_m & Z_1 & Z_m \end{bmatrix}$$

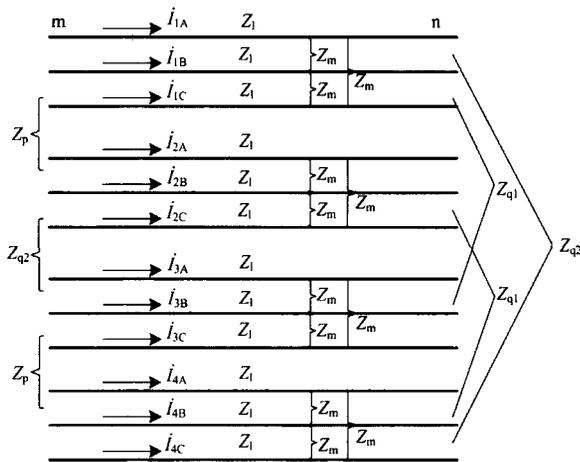


图 1 同塔四回线

Fig.1 Quadruple-circuit transmission lines

同塔四回线相模变换如式 (2) 所示^[7]:

$$M^{-1}[U_{mn}] = M^{-1}[Z]M \cdot M^{-1}[I_{mn}] \quad (2)$$

式中, M 、 M^{-1} 分别为相模变换矩阵及变换矩阵的逆矩阵。

经过式 (2) 相模变换后, 利用网络阻抗矩阵被对角化的特点, 计算得以简化, 而电压与电流由相量变换为模量, 表示如下:

$$[U_{mn}]_{mode} = M^{-1}[U_{mn}] \quad (3)$$

$$[I_{mn}]_{mode} = M^{-1}[I_{mn}] \quad (4)$$

式中: $[U_{mn}]_{mode}$ 与 $[I_{mn}]_{mode}$ 为 12 阶列向量, 各分为四组模分量表示如下: $[U_{mn}]_{mode} = [\dot{U}_{e0}, \dot{U}_{e1}, \dot{U}_{e2}, \dot{U}_{f0}, \dot{U}_{f1}, \dot{U}_{f2}, \dot{U}_{g0}, \dot{U}_{g1}, \dot{U}_{g2}, \dot{U}_{h0}, \dot{U}_{h1}, \dot{U}_{h2}]^T$, $[I_{mn}]_{mode} = [\dot{i}_{e0}, \dot{i}_{e1}, \dot{i}_{e2}, \dot{i}_{f0}, \dot{i}_{f1}, \dot{i}_{f2}, \dot{i}_{g0}, \dot{i}_{g1}, \dot{i}_{g2}, \dot{i}_{h0}, \dot{i}_{h1}, \dot{i}_{h2}]^T$ 。

式 (2) 中变换矩阵 M 的选择并非唯一, 文献[7]对变换矩阵 M 所需的充要条件进行了证明。由其充要条件可知, 变换矩阵 M 的选择具有很大空间, 式 (5) 与式 (6) 即是根据其充要条件选择的两个变换矩阵。

$$M_1^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -11 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -10 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M_2^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -11 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -10 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式 (5) 与式 (6) 表示的相模变换矩阵仅在 e_2, f_2, g_2, h_2 四个模分量不相同, 应用在式 (3) 及式

(4)的模分量计算中,除上述四个模分量外,其余的计算方法相同。另外,式(5)与式(6)表明,同塔四回线相模变换中,并不是每个模分量的计算都必须涉及到四回线的12个电压相量或电流相量。如式(5)与式(6),通过选择合适的变换矩阵,相模变换计算时只有各组模分量的零模分量涉及到其他各回线的相量,其余只涉及同一回线下的相量计算。

2 同塔四回线模量电流差动保护

2.1 模量对故障的反映

利用式(5)及式(6)两个不同的相模变换矩阵进行如式(2)所示的相模变换后,得到的各种模量电流分量对线路的故障反映能力是不相同的。因为相模变换后,各模量实际涉及到的相量是不相同的。如经 M_1^{-1} 变换后的 \dot{I}_{e1} 只涉及 \dot{I}_{1A} 与 \dot{I}_{1B} ,即只对第1回线含A、B两相的故障类型有所反映^[9]。以经过 M_1^{-1} 与 M_2^{-1} 两种不同相模变换后电流的 e 模分量为例,表1列出其对第1回线故障反映情况(经 M_2^{-1} 变换后的 e_0 、 e_1 分量与经 M_1^{-1} 变换后相同,不重列出),表中Y表示能反映,N表示不能反映。

表1 不同变换矩阵下模分量对故障的反映

Tab.1 Fault reflection of different modes

模量 e_{ij}	1AG	1BG	1CG	1线两相以上 短路	其他线故障
e_{11}	Y	Y	N	Y	N
e_{12}	Y	N	Y	Y	N
e_{22}	N	Y	Y	Y	N

其中: e_{ij} 角标*i*表示第*i*个变换矩阵变换, $i=1, 2$; j 表示模分量, $j=0, 1, 2$ 。

如表1所示,利用经两个不同变换矩阵变换后的模量电流,能区分故障发生的线路,并且能对该线路进行有效的故障选相。三相输电线路中,一共有11种故障类型,表中各模量的组合只能正确反映单相故障类型。同塔四回线中不同回线跨线故障时,目前并无良好的针对四回线的综合跳闸方案,一般说来,每回线采用常规的单回线分相跳闸方式即能满足现场需求。超高压线路中,分相跳闸只针对于单相故障,两相及两相以上故障需跳三相。所以,表中列出的5种故障反映情况即能满足第1回线路现有的跳闸指令要求。同样的,其余三种模分量对另外三回传输线路的故障具有相似的反映能力。可利用该特点形成模量电流差动保护。

2.2 保护判据及动作逻辑

按照传统电流差动的保护判据,可以形成相应的同塔四回线模量差动保护判据如下。

$$\begin{cases} |\dot{I}_{mj} + \dot{I}_{nj}| > I_{dz} \\ |\dot{I}_{mj} + \dot{I}_{nj}| > k_{zd} |\dot{I}_{mj} - \dot{I}_{nj}| \end{cases} \quad (7)$$

式中: $j = \{e_{11}, e_{12}, e_{22}, f_{11}, f_{12}, f_{22}, g_{11}, g_{12}, g_{22}, h_{11}, h_{12}, h_{22}\}$; I_{dz} 为定值, k_{zd} 为制动系数。

对于同塔四回线,分布电容电流对电流差动保护的影响较显著,电流差动保护在应用时应考虑电容电流的补偿^[3]。在进行电容电流补偿时,为了计算简便,一般将相量变换到模量下进行补偿。对于式(7)所示的模量差动,其电容电流的时域补偿式如下:

$$\begin{cases} \dot{i}_{kj}^c = C_{kj} \frac{du_{kj}}{dt} \\ \dot{i}'_{kj} = \dot{i}_{kj} - \dot{i}_{kj}^c \end{cases} \quad (8)$$

式中: u, i 为电压电流瞬时值; $k = m, n$ 表征母线两端电流; $j = \{e_{11}, e_{12}, e_{22}, f_{11}, f_{12}, f_{22}, g_{11}, g_{12}, g_{22}, h_{11}, h_{12}, h_{22}\}$ 表示模量差动中所利用的各模分量; C_{kj} 为相模变换后时域补偿的电容系数。

假设四回线分布电容参数如下:

$2c_0$: 线路对地的电容; $2c_m$: 相间分布电容;

$2c_p$: 1线与2线、3线与4线间分布电容;

$2c_q$: 1线与3线、2线与4线间分布电容;

$2c_s$: 1线与4线、2线与3线间分布电容。

采用相模变换计算后,补偿电流为:

$$\dot{i}_{kj}^c = [c_0 + 3(c_m + c_p + c_q + c_s)] \frac{du_{kj}}{dt} \quad (9)$$

即式(8)中各模量对应的电容系数相同,并且式(9)中的电流与电压瞬时值模量运算只包含同一回线中的两相电压量与电流量的计算,计算更简单方便。

按经过式(8)所示时域补偿后的线路电流形成式(7)所示的保护判据,即能形成经电容电流补偿后的同塔四回线模量电流差动保护。此模量电流差动保护能分相动作,以第1回线为例,其选相逻辑如图2所示。

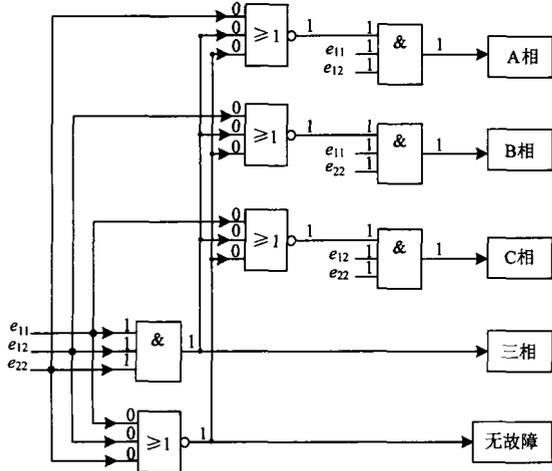


图2 模量差动保护的选相逻辑
Fig.2 Logic diagram of fault phase selection

3 仿真分析

如图3所示为500 kV同塔四回线系统图,利用PSCAD/EMTDC建立相应的分布参数仿真模型。系统阻抗参数如下:

$$Z_{sm1} = Z_{sm2} = 0.37984 + j30.0368 \Omega;$$

$$Z_{sm0} = 0.16752 + j10.07024 \Omega;$$

$$Z_{sn1} = Z_{sn2} = 1.8992 + j150.184 \Omega;$$

$$Z_{sn0} = 0.8376 + j50.3512 \Omega.$$

线路总长240 km, 参数如下:

$$Z_1 = 5.46646884E-5 + j4.46544593E-4 \Omega/m;$$

$$Z_m = 3.58039955E-5 + j1.86935355E-4 \Omega/m;$$

$$Z_p = 3.57793957E-5 + j1.56028860E-4 \Omega/m;$$

$$Z_q = 3.42629616E-5 + j1.35220853E-4 \Omega/m;$$

$$Z_s = 3.41949655E-5 + j1.20759700E-4 \Omega/m;$$

$$2C_0 = 1.1150327598E-10 \Omega/m;$$

$$2C_m = 5.84643780E-10 \Omega/m;$$

$$2C_p = 2.32850211E-10 \Omega/m;$$

$$2C_q = 1.89443586E-10 \Omega/m;$$

$$2C_s = 6.43490564E-11 \Omega/m.$$

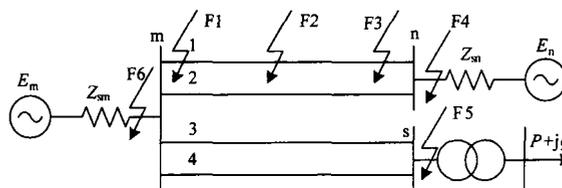


图3 500 kV同塔四回线系统图
Fig.3 500 kV quadruple-circuit transmission lines system

仿真中,系统两端电源电势角差考虑 0° 、 30° 、 60° 共3种;设置6个故障点,其中F1~F3为均匀分布在线路上的3个内部故障点,F4~F6为3个外部故障点。单回线故障发生的概率最大,仿真中主要考虑单回线故障,且单相接地短路的接地过渡电阻考虑 $0\sim 400 \Omega$ 。仿真计算中,采样频率为2000 Hz,采用自适应的数据窗计算相应相量。例如对三相短路等严重故障,采用短数据窗计算时,虽然故障信息不够充分,相应的定值就要选择的大些,但是由于电流变化大,仍然能够保证可靠出口,有效提高保护的速度。当采用全周波数据计算时,由于故障信息比较充分,定值可以小些,保证了保护的灵敏度。

表2 第1回线单线故障及区外故障时第1线动作情况(功角差 60°)

Tab.2 Relay operation of fault on the first circuit and out of protection area(power-angle difference 60°)

故障类型	F1		F2		F3		F4-F6	
	选相结果	动作时间/ms	选相结果	动作时间/ms	选相结果	动作时间/ms	选相结果	动作时间/ms
AG	A	7	A	8.5	A	8	NF	
BG	B	7	B	8.5	B	8	NF	
CG	C	8.5	C	10.5	C	10.5	NF	
ABG	T	2.5	T	3.5	T	3.5	NF	
ACG	T	6	T	5	T	6.5	NF	
BCG	T	3.5	T	6.5	T	5.5	NF	
ABC	T	2.5	T	3.5	T	3.5	NF	
AB	T	2.5	T	3.5	T	3.5	NF	
AC	T	3.5	T	4.5	T	4.5	NF	
BC	T	7.5	T	8.5	T	8.5	NF	

A、B、C 分别表示 A、B、C 相动作, T 表示三相动作, NF 表示不动作, 下同。

表 3 F2 点跨线故障时动作情况 (功角差 30°)

Tab.3 Relay operation of cross-country faults on F2(power-angle difference 30°)

故障类型	1 线		2 线		3 线		4 线	
	选相结果	动作时间/ms	选相结果	动作时间/ms	选相结果	动作时间/ms	选相结果	动作时间/ms
2A4AG	NF		A	8	NF		A	8
2AB4ABG	NF		T	3	NF		T	3
2ABC4ABC	NF		T	4	NF		T	4.5
2AB4AB	NF		T	3	NF		T	3
1A2A3AG	A	9	A	9	A	9	NF	
1AB2AB3ABG	T	4	T	4	T	3	NF	
1ABC2ABC3ABC	T	4.5	T	4.5	T	4.5	NF	
1AB2AB3AB	T	4	T	4	T	3	NF	
1A2A3A4AG	A	9.5	A	9.5	A	10	A	10
1AB2AB3AB4ABG	T	4	T	4	T	5	T	5
1ABC2ABC3ABC4ABC	T	4.5	T	4.5	T	5	T	5
1AB2AB3AB4AB	T	4	T	4	T	5	T	5

表 4 1BG 故障动作时间

Tab.4 Operation time with fault 1BG

功角差	ms								
	0	0.1	1	10	50	100	200	300	400
0°	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	7	8	8.5
30°	7	7	7	7	7	7.5	9	14	15.5
60°	7	7	7.5	7.5	8.5	14	16	19.5	25

表 2~4 为仿真计算结果。如表 2 所示, 区外单相故障时, 保护能可靠保证不误动, 区内故障时能灵敏动作, 且对于单相接地故障, 能进行准确的故障选相动作。比较表 2 区内故障不同故障点的动作时间可知, 故障位置的不同对保护并无太大影响。

表 3 是线路两端电源功角差为 30° 时跨线故障的仿真计算结果。跨线故障时, 故障线能快速动作, 非故障线可靠不动作, 保护能进行正确选线。跨线故障中每回线上的单相故障, 保护同样能快速选相动作。

表 4 所示为第 1 回线单相故障时动作情况。如表 4 所示, 过渡电阻的加大使得动作速度减慢。同时, 两端电源功角差对保护的動作速度也有影响, 在重负荷情况下动作速度会降低。但是, 即使在重负荷下保护也能对高阻故障进行反应, 充分说明了保护的有效性。

4 结论

选取不同的同塔四回线相模变换矩阵, 相模变换得到的模量对故障有不同的反映能力。本文基于

经两个不同变换矩阵对四回线电流相模变换得到的模量, 形成电流差动保护方案。此保护方案综合各模量信息能进行单相接地故障时的故障相判别, 并且进行电容电流补偿计算时只涉及同一回线中的电流与电压量, 电容电流补偿简单。PSCAD/EMTDC 仿真验证表明, 此保护方案具有很强的耐受过渡电阻能力, 动作速度快, 对四回线中的跨线故障有很好的反映, 并且能快速选择各回线中单相故障时的故障相动作。

参考文献

- [1] 伍叶凯, 邹东霞. 电容电流对差动保护的影响及补偿方案[J]. 继电器, 1997, 25(4): 4-8.
WU Ye-kai, ZOU Dong-xia. The influence of capacitance current to differential protection and its compensation scheme[J]. Relay, 1997, 25(4): 4-8.
- [2] 李岩, 陈德树, 张哲, 等. 超高压长线电容电流对差动保护的影响及补偿对策仿真分析[J]. 继电器, 2001, 29(6): 6-9.
LI Yan, CHEN De-shu, ZHANG Zhe, et al. The emulation analysis for the influence of capacitance current of UHV transmission line on differential current protection and compensating countermeasure[J]. Relay, 2001, 29(6): 6-9.
- [3] 毕天姝, 于艳莉, 黄少锋, 等. 超高压线路差动保护电容电流的精确补偿方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 30-34.
BI Tian-shu, YU Yan-li, HUANG Shao-feng, et al. Novel accurate compensation method of capacitance current of UHV transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 30-34.

(下转第 43 页 continued on page 43)

- Calculation of voltage stability margin by load flow Jacobian matrices and taking account of generator unit dynamics[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21 (4) : 13-16.
- [9] 张元鹏,周双喜,王利锋,等. 静态电压稳定性分析模型的理论基础[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19 (10) : 55-63.
ZHANG Yuan-peng, ZHOU Shuang-xi, WANG Li-feng, et al. The theoretical foundations of static voltage stability analysis model[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19 (10) : 55-63.
- [10] 牟小松,成涛,林莉,等. 汽轮机系统对电力系统低频振荡的影响[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2006, 29 (2) : 54-56.
MU Xiao-song, CHENG Tao, LIN Li, et al. Influence of steam turbine system on low frequency oscillation[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006, 29 (2) : 54-56.
- [11] 金字清,岳陈熙,甄威,等. 基于功角测量的同步发电机参数辨识频域法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (4) : 7-10.
JIN Yu-qing, YUE Chen-xi, ZHEN Wei, et al. On-line frequency response method of synchronous machine parameter identification based on rotor angle measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (4) : 7-10.
- [12] 米增强,陈志忠,南志远,等. 同步发电机动态参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18 (2) : 100-105.
MI Zeng-qiang, CHENG Zhi-zhong, NAN Zhi-yuan, et al. Dynamic parameter identification of synchronous machines[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18 (2) : 100-105.
- [13] 周海强,茆超,鞠平,等. 考虑配电网的综合负荷模型可辨识性分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (16) : 16-19.
ZHOU Hai-qiang, MAO Chao, JU Ping, et al. An identifiability analysis of a synthetic load model with the distribution network considered[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (16) : 16-19.
- [14] 夏向阳,张一斌,蔡灏. 电力受端系统的稳定问题及其对策分析[J]. 继电器, 2005, 33 (17) : 74-78.
XIA Xiang-yang, ZHANG Yi-bin, CAI Hao. Problems and countermeasures of power receiver system stability[J]. Relay, 2005, 33 (17) : 74-78.

收稿日期: 2009-10-15; 修回日期: 2010-01-18

作者简介:

杨浩(1960-),男,副教授,从事电力系统信号处理、运行与控制的研究;

牛强(1980-),男,硕士研究生,从事电力系统运行与控制的研究; E-mail: 20071102147@cqu.edu.cn

吴迎霞(1977-),女,工程师,从事电力系统运行与控制的研究。

(上接第 37 页 continued from page 37)

- [4] 索南加乐,张恽宁,齐军,等. Π 模型时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (5) : 12-18.
SUONAN Jia-le, ZHANG Yi-ning, QI Jun, et al. Study of current differential protection using time-domain capacitive current compensating algorithm on Π -model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (5) : 12-18.
- [5] 索南加乐,张恽宁,齐军,等. 基于时域电容电流补偿的电流差动保护研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39 (12) : 1370-1374.
SUONAN Jia-le, ZHANG Yi-ning, QI Jun, et al. Current differential protection based on time-domain algorithm of capacitive current compensating[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2005, 39 (12) : 1370-1374.
- [6] 吴通华,郑玉平,朱晓彤. 基于暂态电容电流补偿的线路差动保护[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (12) : 61-66.
WU Tong-hua, ZHENG Yu-ping, ZHU Xiao-tong. Current differential protection based on transient capacitance current compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (12) : 61-66.
- [7] 张琦兵,邵能灵,袁成,等. 同塔四回输电线的相模变换[J]. 中国电机工程学报, 已录用.
ZHANG Qi-bing, TAI Neng-ling, YUAN Cheng, et al. Phase-mode transformation of four-parallel lines on the same tower[J]. Proceedings of the CSEE, accepted.
- [8] 宋国兵,李森,康小宁,等. 一种新相模变换矩阵. 电力系统自动化, 2007, 31 (14) : 57-60.
SONG Guo-bing, LI Sen, KANG Xiao-ning, et al. A novel phase-mode transformation matrix[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (14) : 57-60.

收稿日期: 2009-09-24; 修回日期: 2009-11-01

作者简介:

张琦兵(1985-),男,硕士研究生,主要从事电力系统保护与控制方向的研究; E-mail: zqb_312@163.com

邵能灵(1972-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统继电保护、电力系统安全稳定控制及电力市场的教学和研究工作。