

双端带并联电抗器的输电线路纵联保护

索南加乐¹, 孙成¹, 杨铖¹, 张健康², 康小宁¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 西北电力调度通信中心, 710048, 西安)

摘要: 提出了一种基于参数识别的双端带并联电抗器的输电线路纵联保护原理. 在故障附加状态网络的基础上, 为内部故障和外部故障建立了具有相同形式的电感模型. 利用参数识别的原理求取模型中的电感参数, 并计算其对应感抗. 内部故障时, 它反映两端的系统感抗, 为一个较小的负数; 外部故障时, 它反映并联电抗器的感抗, 是一个较大的正数. 根据所得感抗的符号和大小来区分内部故障和外部故障. 该原理采用了基于线路 π 模型的解微分方程算法, 不受非周期分量和过渡电阻的影响, 整定简单. EMTP 和动模实验数据仿真验证了该方法的有效性.

关键词: 输电线路; 纵联保护; 参数识别; 并联电抗器

中图分类号: TM773 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)10-0099-05

Novel Pilot Protection for Transmission Line with Shunt Reactor at Double Terminal

SUONAN Jiale¹, SUN Cheng¹, YANG Cheng¹, ZHANG Jiankang², KANG Xiaoning¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Northwest China Power Dispatch & Communication Center, Xi'an 710048, China)

Abstract: A new type of pilot protection for transmission line with shunt reactors at double terminal following parameter identification is proposed. Based on the fault component nets, R-L models with the same pattern are established for the internal fault state and the external fault state. The inductance in R-L models can be evaluated by parameter identification. When an internal fault occurs, the inductance reflects the impedance of the system source as a smaller minus, and when an external fault occurs, it signs the inductance of reactor as a greater positive, thus the internal fault and external fault are distinguished. The criterion is not influenced by the transient components and fault resistance, and also can be easily set. EMTP simulation shows the higher sensitivity, reliability and effectiveness.

Keywords: transmission line; pilot protection; parameter identification; shunt reactor

电流差动保护以其原理简单、选择性好、灵敏度高、适合系统振荡和非全相运行等各种状态, 在电力系统中得到了广泛应用^[1]. 但是, 高压输电系统中分布电容电流较大, 严重影响了差动保护的灵敏度和可靠性.

在特高压和超高压远距离输电系统中, 为抑制过电压通常在线路两端装设并联电抗器, 但并联电抗器不能补偿全部电容电流, 且在故障暂态过程中,

并联电抗器为低频分量和衰减直流分量提供通路, 有可能增大不平衡电流造成保护误动.

目前, 为提高差动保护性能采取的措施主要有提高保护整定值、对电容电流进行补偿(包括向量补偿^[2]和时域补偿^[3])以及采用不受分布电容电流影响的新原理^[4-6]. 提高保护整定值会影响到保护的灵敏度, 由于不能确定线路精确参数和并联电抗器电流, 电容电流补偿也很难达到理想的补偿效果. 一些

新原理虽然取得了较好的仿真结果,但也存在问题,如基于贝瑞隆模型的差动保护需要线路精确参数,数据采样频率要受到输电线路长度限制等。

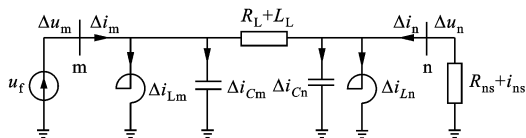
近年来,参数识别的保护原理在方向元件^[7]和小电流系统单相故障选线^[8]等方面取得了较好的效果,其基本思想是通过网络元件参数的识别获取故障信息.本文针对双端带并联电抗器的输电线路,提出了一种基于参数识别的纵联保护新原理,其保护判据避开直接电气量的比较,灵敏度较高。

1 基本原理

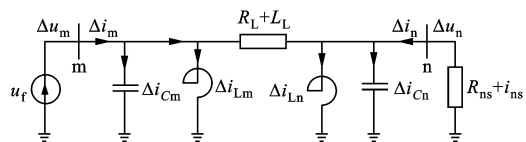
系统发生故障时可将系统视为非故障状态网络和故障附加状态网络的叠加,下面以单相故障附加状态网络模型为例,来说明基于参数识别的纵联线路保护新原理。

1.1 外部故障模型

单相线路发生外部故障时的故障附加状态网络见图1a,为了公式推导简明,得其等效网络见图1b,假定电流的正方向由母线指向被保护线路。



(a) 外部故障附加状态网络



(b) 外部故障附加状态等效网络

图1 单相线路外部故障时的故障附加状态网

图1b中,流过电抗器的电流分别为 Δi_{Lm} 和 Δi_{Ln} ,由此可得系统两端的电压分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_m &= L_L \frac{d\Delta i_{Lm}}{dt} + R_L \Delta i_{Lm} \\ \Delta u_n &= L_L \frac{d\Delta i_{Ln}}{dt} + R_L \Delta i_{Ln} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: L_L 为并联电抗器的等效电感; R_L 为并联电抗器的电阻.式(1)中两式相加可得外部故障模型

$$\begin{aligned} \Delta u_m + \Delta u_n &= \\ L_L \frac{d(\Delta i_{Lm} + \Delta i_{Ln})}{dt} + R_L (\Delta i_{Lm} + \Delta i_{Ln}) &= \\ L_L \frac{d(\Delta i'_m + \Delta i'_n)}{dt} + R_L (\Delta i'_m + \Delta i'_n) & \quad (2) \end{aligned}$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \Delta i'_m &= \Delta i_m - \Delta i_{Cm} = \Delta i_m - C \frac{d\Delta u_m}{dt} \\ \Delta i'_n &= \Delta i_n - \Delta i_{Cn} = \Delta i_n - C \frac{d\Delta u_n}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: C 为输电线路 π 模型中的电容,在线路结构和长度已知的情况下, C 为一个确定的值。

1.2 内部故障模型

单相线路发生内部故障时的故障附加状态网络如图2所示.由于线路分布电容的等效容抗远大于两侧系统阻抗,分布电容电流远小于流过系统阻抗的电流,因此可以忽略电容电流的影响。

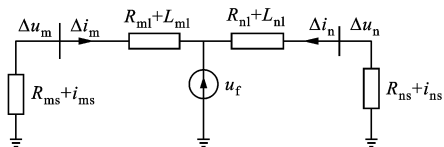


图2 单相线路内部故障时的故障附加状态网

图2中,系统两端的电压分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_m &= -L_{ms} \frac{d\Delta i_m}{dt} - R_{ms} \Delta i_m \\ \Delta u_n &= -L_{ns} \frac{d\Delta i_n}{dt} - R_{ns} \Delta i_n \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: L_{ms} 、 L_{ns} 和 R_{ms} 、 R_{ns} 分别为线路两端的系统阻抗中的电感和电阻.式(4)中两式相加可得内部故障模型

$$\begin{aligned} \Delta u_m + \Delta u_n &= \\ - \left(L_{ms} \frac{d\Delta i_m}{dt} + L_{ns} \frac{d\Delta i_n}{dt} \right) - (R_{ms} \Delta i_m + R_{ns} \Delta i_n) &= \\ (L_{ms} k_m + L_{ns} k_n) \frac{d(\Delta i_m + \Delta i_n)}{dt} + \\ (R_{ms} k_m + R_{ns} k_n) (\Delta i_m + \Delta i_n) &= \\ - L_{seq} \frac{d(\Delta i_m + \Delta i_n)}{dt} - R_{seq} (\Delta i_m + \Delta i_n) & \quad (5) \end{aligned}$$

式中: $L_{seq} = (L_{ms} k_m + L_{ns} k_n)$ 为两端系统阻抗的等效电感; $R_{seq} = (R_{ms} k_m + R_{ns} k_n)$ 为等效电阻; $k_m = \Delta i_m / (\Delta i_m + \Delta i_n)$; $k_n = \Delta i_n / (\Delta i_m + \Delta i_n)$.在高压电网中,故障分量网络的分布系数为实数,即 Δi_m 、 Δi_n 近似为同相位,所以 k_m 、 k_n 均为实数^[9]。

1.3 保护原理与判据

由以上分析,外部故障模型和内部故障模型具有相同的形式,可将式(2)和式(5)统一写为

$$\Delta u_{cd} = L \frac{d\Delta i_{cd}}{dt} + R \Delta i_{cd} \quad (6)$$

其中,分别定义差动电压和差动电流为

$$\Delta u_{cd} = \Delta u_m + \Delta u_n; \quad \Delta i_{cd} = \Delta i'_m + \Delta i'_n \quad (7)$$

这里需要特别指出, Δi_{cd} 并不是传统意义上的差动电流, 它是由传统差动电流减去电容电流得到的, 也即经过电容电流补偿后的差动电流。

利用式(6)计算出模型参数 L , 并定义识别感抗

$$X_L = 2\pi fL; \quad f = 50 \text{ Hz} \quad (8)$$

外部故障时, $L = L_L$, $X_L > 0$, 为并联电抗器的感抗, 一般都在 $1 \text{ k}\Omega$ 以上; 内部故障时, $L = -L_s$, $X_L < 0$, 在数值上 X_L 等价于两端的系统感抗, 其数值远小于 $1 \text{ k}\Omega$ 。因此, 可以通过 X_L 的符号和大小来判别内部故障和外部故障。考虑在实际电力系统中并联电抗器的参数已知, 可利用并联电抗器的感抗进行动作判据整定。本文据此提出以下保护判据

$$\left. \begin{aligned} X_L < 0; & |X_L| < X_{\text{set}} \\ \Delta u_{cd} > & \Delta u_{\text{set}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: $X_{\text{set}} = K_k \times 2\pi fL_L$, K_k 为可靠系数, 取为 0.5; $\Delta u_{cd} > \Delta u_{\text{set}}$ 为启动元件; Δu_{set} 为差动电压门槛值, 可取经验值。

启动元件保证差动电压具有一定的幅值以确定识别参数的准确性, 例如在发生两相短路时, 非故障相的故障分量电压理论值为 0, 这时利用式(6)就不能得到准确的参数。

2 算法实现过程

(1) 获取各相电压和电流的故障分量。某一采样时刻的电压故障分量可表示为

$$\Delta u_k(k) = u(k) - u(k-N) \quad (10)$$

式中: $u(k)$ 为电压在某一时刻 k 的采样值; N 为一个工频周期的采样点数; $u(k-N)$ 为电压在时刻 k 前一周期的采样值。按同样的方法可以得到电流故障分量。

(2) 利用线路的频带适用范围^[10], 设计一个截止频率适当的低通滤波器, 滤除不再适用的高次谐波, 消除模型误差的影响。

(3) 采用三点微分公式计算微分值。

(4) 利用最小二乘法求取待识别参数, 使用最小二乘参数估计可以使模型特征得到更加充分的体现, 减小了数据采样误差和计算误差等给参数识别带来的波动性。

3 仿真分析

为了验证上述理论分析的正确性, 本文采用电磁暂态仿真程序进行数字仿真实验。线路两端带并联电抗器的仿真系统为华中某 500 kV 线路系统, 线路全长为 342 km , 其等效双电源系统如图 3 所

示。采样频率为 2 kHz , 最小二乘法采用 5 ms 数据窗。

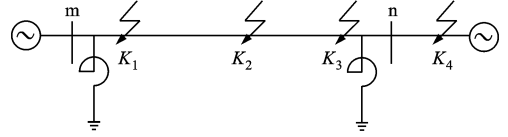


图 3 实验模型

线路参数

$$Z_{10} = 0.027 + 0.3033 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$Z_{00} = 0.1957 + 0.6945 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$\omega c_1 = 4.281 \times 10^{-6} \text{ S/km}$$

$$\omega c_0 = 2.859 \times 10^{-6} \text{ S/km}$$

两端系统参数

$$E_m = 1.05 \angle 0^\circ; \quad E_n = 1 \angle -30^\circ$$

$$X_{1m} = 95.669 \text{ } \Omega; \quad X_{0m} = 199.20 \text{ } \Omega$$

$$X_{1n} = 148.10 \text{ } \Omega; \quad X_{0n} = 45.94 \text{ } \Omega$$

电抗器参数

$$X_L = 2017 \text{ } \Omega; \quad X_N = 550 \text{ } \Omega$$

表 1 列出了在 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 4 个点发生不同类型金属性故障时的三相识别感抗计算结果, 其中 X_{L_a} 、 X_{L_b} 和 X_{L_c} 分别代表 a、b、c 三相的识别感抗。表 2 列出了线路 a 相发生经不同过渡电阻接地故障时的仿真结果, 其中 R_F 表示接地过渡电阻, 分别取 $100 \text{ } \Omega$ 、 $200 \text{ } \Omega$ 和 $500 \text{ } \Omega$ 。

从表 1 可见, 仿真系统在内部(即 K_1 、 K_2 和 K_3 点)发生不同类型的金属性故障时, 其识别感抗在 $120 \text{ } \Omega$ 左右, 而非故障相的识别感抗在 $2 \text{ k}\Omega$ 以上, 保护判据能准确地区分故障相并判为内部故障。在外部(即 K_4 点)发生故障时, 故障相和非故障相的识别感抗都在 $2 \text{ k}\Omega$ 以上, 保护判据能准确地判断为外部故障。由表 2 可以看出, 过渡电阻对识别感抗的影响非常小, 保护判据能识别出故障相并能准确区分内部故障和外部故障。

4 动模实验数据仿真

本文还使用了兰州东至咸阳的 750 kV 输电线路的动模实验数据做仿真验证, 动模实验系统如图 4 所示。

输电线路长为 497 km , 主要参数如表 3 所示。并联电抗器 #1、#2、#3 容量均为 $3 \times 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, #4 容量为 $3 \times 90 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。系统运行方式为双回线额定负荷方式, 在试验线路的两端和中间共设有 7 个故障点, 编号依次为 $k_1 \sim k_7$ 。动模

表 1 金属性故障时 EMTP 仿真结果

故障点	故障类型	X_{L_a}/Ω	X_{L_b}/Ω	X_{L_c}/Ω	X_{set}/Ω
K_1	AG	-128	2 427	2 482	1 008.5
	ABCG	-115.9	-118.4	-118	1 008.5
	BCG	2 449	-119.7	-123.8	1 008.5
	BC	2 463	-119	-119	1 008.5
K_2	AG	-118.7	2 403	2 634	1 008.5
	ABCG	-131.6	-128.4	-128.6	1 008.5
	BCG	2 565	-123.7	-125.3	1 008.5
	BC	2 463	-127.5	-127.5	1 008.5
K_3	AG	-111.7	2 442	2 488	1 008.5
	ABCG	-132.8	-135.1	-136.1	1 008.5
	BCG	2 437	-115.4	-114.6	1 008.5
	BC	2 463	-136.5	-136.5	1 008.5
K_4	AG	2 222	2 442	2 488	1 008.5
	ABCG	2 098	2 181	2 425	1 008.5
	BCG	2 437	2 277	2 472	1 008.5
	BC	2 463	2 448	2 448	1 008.5

表 2 单相带过渡电阻接地故障的 EMTP 仿真结果

故障点	R_f/Ω	X_{L_a}/Ω	X_{L_b}/Ω	X_{L_c}/Ω	X_{set}/Ω
K_1	100	-128.6	2 439	2 475	1 008.5
	200	-128.6	2 447	2 472	1 008.5
	500	-128.7	2 452	2 467	1 008.5
K_2	100	-120.2	2 510	2 491	1 008.5
	200	-120.3	2 503	2 466	1 008.5
	500	-120.3	2 481	2 458	1 008.5
K_3	100	-111.6	2 452	2 474	1 008.5
	200	-111.5	2 457	2 470	1 008.5
	500	-111.7	2 457	2 466	1 008.5
K_4	100	2 427	2 452	2 474	1 008.5
	200	2 443	2 457	2 470	1 008.5
	500	2 462	2 457	2 466	1 008.5

实验数据的仿真验证结果见表 4.

由表 4 可知在发生内部故障时,故障相的识别感抗均为负值,大小约为几十欧姆,非故障相的识别感抗在 $1\text{ k}\Omega$ 以上,保护可以准确选相并动作. 外部故障时,故障相和非故障相的识别感抗均大于整定

感抗,保护可靠不动作.

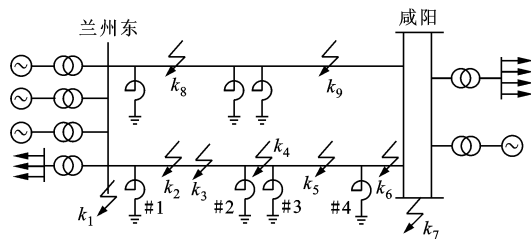


图 4 750 kV 输电系统图

表3 输电线路主要参数(每100 km)

X_1/Ω	$\Phi_1/(^{\circ})$	$C_1/\mu\text{F}$	X_0/Ω	$\Phi_0/(^{\circ})$	$C_0/\mu\text{F}$
26.8	87.4	1.367	84	72	0.93

表 4 动模数据仿真结果

故障位置	故障类型	X_{L_a}/Ω	X_{L_b}/Ω	X_{L_c}/Ω	X_{set}/Ω
k_1	BG	1 106	1 146	1 072	500
k_1	BC	1 085	1 248	984	500
k_1	BCG	1 149	1 448	1 102	500
k_2	AG	-24	1 141	1 181	500
k_3	AG	-25	1 061	1 181	500
k_3	BC	1 112	-28	-28	500
k_3	ABC	-29	-28	-32	500
k_4	BG	1 140	-22	1 114	500
k_5	BG	1 243	-21	1 100	500
k_6	CG	1 073	1 150	-20	500
k_7	AG	1 093	1 187	1 201	500

5 结 论

本文提出了一种基于参数识别的线路纵联保护新原理,经理论分析和仿真实验可以得到以下结论.

(1) 外部故障识别感抗为并联电抗器的感抗, 内部故障识别感抗为两端的系统等效感抗, 利用两者的符号和大小关系判别内部和外部故障, 具有灵敏度高、整定容易的优点。

(2)当输电线路发生故障时,非故障相相当于发生外部故障,保护判据对故障相和非故障相都适用,可分相动作.

(3)原理采用基于 π 模型的解微分方程算法,利用系统固有参数构成判据,有较好的适用频带,滤波

所需时间短,保护可在暂态过程中快速动作。

参考文献:

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 1-2.
- [2] 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 Yekai, ZOU Dongxia. The influence of capacitance current to differential protection and its compensation scheme[J]. Relay, 1997, 25(4): 4-8.
- [3] 索南加乐, 张怿宁, 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 Jiale, ZHANG Yining, QI Jun, et al. Current differential protection based on time-domain algorithm of capacitive current compensating[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(12), 1370-1374.
- [4] 郑玉平, 吴通华, 丁琰, 等. 基于贝瑞隆模型的线路差动保护实用判据[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 50-55.
WU Tonghua, ZHENG Yuping, DING Yan, et al. Applied criterion of current differential protection based on Bergeron mode[J]. Automation of Electric Power, 2004, 28(23): 50-55.
- [5] 文明浩, 陈德树, 尹项根. 远距离输电线路等传变瞬时值差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28): 59-65.
WEN Minghao, CHEN Deshu, YIN Xianggen. Long transmission line current differential protection by using instantaneous value after equal transfer processes [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 59-65.
- [6] 张武军, 何奔腾, 沈冰. 特高压带并联电抗器的行波差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 56-61.
- [7] 索南加乐, 王向兵, 孟祥来, 等. 基于 R-L 模型的参数识别快速方向元件[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(6): 690-693.
SUONAN Jiale, WANG Xiangbing, MENG Xianglai, et al. Quick directional element based on R-L model parameter identification[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(6), 690-693.
- [8] 索南加乐, 薛晓辉, 高峰, 等. 小电流接地系统单相故障选线的研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(4): 471-475
SUONAN Jiale, XUE Xiaohui, GAO Feng et al. Fault line selection in non solid earthed network[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(4): 471-475.
- [9] 索南加乐, 杨钺, 杨忠礼, 等. 基于模型识别的输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化学, 2008, 32(24): 30-34.
SUONAN Jiale, YANG Cheng, YANG Zhongli, et al. New type of transmission line pilot protection base on model identification [J]. Automation of Electric Power, 2008, 32(24): 30-34.
- [10] 索南加乐, 康小宁, 宋国兵, 等. 基于参数识别的继电保护原理初探[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(1): 14-20.
SUONAN Jiale, KANG Xiaoning, SONG Guobing, et al. Survey on relay protection using parameter identification[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(1): 14-20.

(编辑 杜秀杰)