

多回线同杆并架产生的循环电流及其补偿

韦钢 张一尘 上海电力学院 (200090)

【摘要】 分析了多回线同杆并架时产生的电磁感应电压和循环电流。采用 EM TP 程序对模型系统进行了计算。探讨了补偿循环电流的方法。有利于继电保护装置的正确动作。

【关键词】 多回线 并架 循环电流 补偿

引言

随着国民经济的高速发展, 电力的需求量越来越大, 输电走廊用地的紧张状况已引起人们的高度重视, 同杆并架多回线作为有效利用土地, 降低电力建设投资, 增加电力输送容量, 提高供电可靠性的有效手段, 国外已有采用, 可以预计在我国电力负荷的中心地区, 今后必将会出现此种新型的输电方式。

多回线同杆并架, 由于导线与导线之间、导线与大地之间存在的电磁耦合和静电耦合, 在导线上将产生电磁感应电压和静电感应电压, 若被感应线路是双回线并列运行时, 在双回线中还将产生出循环电流。这些由于感应而产生的电流或电压, 对传统的继电保护装置将造成影响, 使原有的保护装置在某些情况下出现误动或拒动, 其中循环电流的影响尤为突出。本文分析计算了循环电流的大小, 探讨了补偿循环电流的方法。

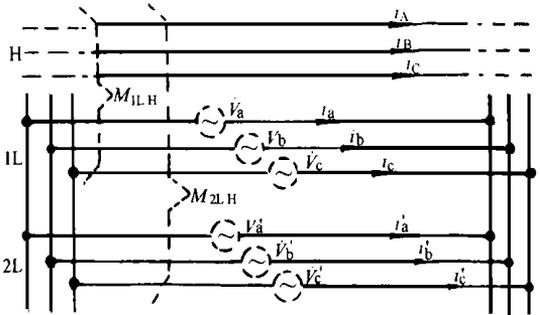


图 1 并架感应线路

1 循环电流的产生及计算

1.1 循环电流的分析

多回线同杆并架线路, 由于导线与导线之间的几何电气距离不可能完全对称, 导线与导线之间存在着电磁的耦合关系。如图 1 所示, 即: 感应线 H 与被感应线 1L、2L 通过互感 ($M_{1L,H}; M_{2L,H}$) 有电磁的耦合, 则在 1L、2L 线上将产生如式 1 所示的电磁感应电压。

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{1L} \\ \dots \\ \dot{V}_{2L} \end{bmatrix} = -j\omega \begin{bmatrix} M_{1L,H} \\ \dots \\ M_{2L,H} \end{bmatrix} [I_H] \quad (1)$$

式中 $[\dot{V}_{1L}] = [\dot{V}_a \ \dot{V}_b \ \dot{V}_c]^T$, $[\dot{V}_{2L}] = [\dot{V}'_a \ \dot{V}'_b \ \dot{V}'_c]^T$
 $[I_H] = [I_A \ I_B \ I_C]^T$

$$[M_{1L,H}] = \begin{bmatrix} M_{aA} & M_{aB} & M_{aC} \\ M_{bA} & M_{bB} & M_{bC} \\ M_{cA} & M_{cB} & M_{cC} \end{bmatrix}, \quad [M_{2L,H}] = \begin{bmatrix} M_{aA} & M_{aB} & M_{aC} \\ M_{bA} & M_{bB} & M_{bC} \\ M_{cA} & M_{cB} & M_{cC} \end{bmatrix}$$

M_{aA} 为感应线 A 相与被感应线 a 相之间单位长度互感(其它元素类同)。

l 为并架线路长度。

ω 为角频率。

由于两条被感应线路上的电磁感应电压 $[V_{1L}]$ 、 $[V_{2L}]$ 的不同, 当被感应线路双回线并列运行时, 各相闭合回路在电磁感应电压的作用下产生的循环电流, 可以表示为式 2 的形式。

$$[I_e] = - \frac{1}{2} [Z]^{-1} [V_{1L} - V_{2L}] = \begin{bmatrix} K_{aA} & K_{aB} & K_{aC} \\ K_{bA} & K_{bB} & K_{bC} \\ K_{cA} & K_{cB} & K_{cC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = [K] [I_H] \quad (2)$$

式中 $[I_e] = [I_{ae} \ I_{be} \ I_{ce}]^T$ 为各相循环电流列向量。

$[Z] = j\omega \{ [L_{1L, 2L}] - [M_{1L, 2L}] \}$ 为 1L 线(或 2L 线)的阻抗参数矩阵。

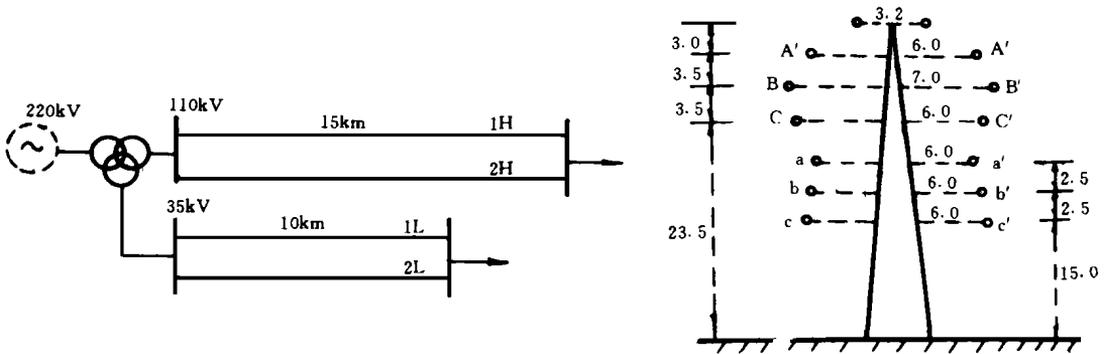
根据式 2: 矩阵 $[K]$ 中的各元素仅决定于线路的互感参数和自感参数, 即: 仅与线路的材料、并架结构、并架长度有关, 而与感应线、被感应线的电流、电压大小无关。

零序循环电流可用式 3 表示。

$$3I_{0e} = I_{ae} + I_{be} + I_{ce} \quad (3)$$

1.2 电磁感应电压及循环电流的计算

模拟计算时采用的简化电力系统和导线的排列结构如图 2 所示。



(a) 模拟计算系统

(b) 并架结构

图 2 并架系统配置结构

本文采用 EM TP 程序(电磁暂态程序), 分别计算了模拟系统导线与导线之间的互感, 以及在各种情况下被感应线路的电磁感应电压、双回线运行时的循环电流。部分计算结果如表 1 所示。

由表 1 的计算结果可见: 被感应线中的循环电流与感应线(H)中电流的大小以及导线的排列方式有关, 而与被感应线路中流过的负荷电流无关。循环电流有较大的零序分量。

1.3 造成的影响

循环电流将使并列运行的双回线输送的功率不平衡。

电磁感应电压中有较大零序分量, 可能造成正常运行时的零序过电压继电器误动作。

循环电流可能造成双回线运行时的横差保护或平衡保护误动或拒动。另外, 由于有较大的零序分量, 当外部或内部接地故障时, 也有可能造成误动或拒动。

因此, 当多回线同杆并架时, 有必要对传统的继电保护装置作改进, 或者寻求克服循环电流影响的新方法。

表 1 被感线的电磁感应电压和循环电流

方式	相别	感应线电流 (A)		电磁感应电压 (V)		循环电流	
		1H	2H	1L	2L	1L	2L
感应线 H 双线运行	A	300.0 - 27	302.0 - 27	94.7 - 169	97.9 55	16.7 - 26	16.7 154
	B	301.9 - 147	301.3 - 147	48.2 - 173	51.3 58	6.74 - 35	6.74 145
	C	302.2 93	301.9 93	25.6 174	28.4 67	2.83 - 41	2.83 139
感应线 H 单线运行	A	605.8 - 28	停运	389.0 - 152	207.5 - 144	17.3 - 41	17.3 139
	B	609.0 - 148	停运	278.2 - 148	187.5 - 144	6.74 - 43	6.74 137
	C	611.9 92	停运	221.4 - 148	177.6 - 144	2.74 - 44	2.74 136
2H 线末端 C 相接地	A	263.8 - 42	291.7 - 47	4292.4 94	4092.9 90	29.8 - 96	29.8 84
	B	298.9 - 157	299.6 - 157	3975.3 92	3876.7 90	12.1 - 105	12.1 75
	C	931.7 35	944.4 37	3770.9 91	3728.9 90	5.06 - 110	5.06 70

2 循环电流的补偿方法

为了使继电保护装置能正确动作, 输入继电保护装置的各相电流、零序电流, 或者是各相差电流、零序差电流, 均应进行循环电流的补偿。由于微机继电保护装置的应用, 使得补偿易于实现, 且更为准确。

2.1 感应线正常, 被感应线故障时的补偿

根据前述的计算分析结果, 循环电流的大小与感应线路的运行方式有关, 而与被感应线路中流过的电流大小或故障与否没有关系。因此根据被感应线路发生的各种故障形式, 可以进行循环电流的补偿。

2.1.1 被感应线路单相接地故障时 (以 a 相接地故障为例):

根据对 a 相接地故障的分析, 令:

$$\begin{cases} n_a = \frac{\dot{I}_{ac} + \dot{I}_{bc} + \dot{I}_{cc}}{\dot{I}_{ae}} = \frac{3\dot{I}_{0c}}{\dot{I}_{ae}} \\ n_b = \frac{\dot{I}_{ac} + \dot{I}_{bc} + \dot{I}_{cc}}{\dot{I}_{be}} = \frac{3\dot{I}_{0c}}{\dot{I}_{be}} \\ n_c = \frac{\dot{I}_{ac} + \dot{I}_{bc} + \dot{I}_{cc}}{\dot{I}_{ce}} = \frac{3\dot{I}_{0c}}{\dot{I}_{ce}} \end{cases} \quad (4)$$

根据式 2, 由于感应线路正常运行, 即 $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, 可以证明: n_a, n_b, n_c 仅与矩阵 $[K]$ 中的各元素有关。因为 $[K]$ 矩阵中各元素仅决定于线路的材料、并架结构等因素, 所以可以预先计算加以整定, 存储在计算机内存中。

由式 4 可以得到以下关系:

$$\begin{cases} n_a/n_b = \dot{I}_{be}/\dot{I}_{ae} \\ n_a/n_c = \dot{I}_{ce}/\dot{I}_{ae} \\ n_b/n_c = \dot{I}_{ce}/\dot{I}_{be} \end{cases} \quad (5)$$

* 各相电流的补偿:

由于非故障相二条线路的差电流等于 2 倍的循环电流, 即:

$$\begin{cases} \dot{I}_b - \dot{I}_b = \dot{I}_{bs} = 2\dot{I}_{be} \\ \dot{I}_c - \dot{I}_c = \dot{I}_{cs} = 2\dot{I}_{ce} \end{cases}$$

而故障相二条线路的差电流为:

$$\dot{I}_a - \dot{I}_a = \dot{I}_{as} = 2\dot{I}_{ae} + \dot{I}_{af}$$

式中 \dot{I}_{af} 为故障分量的电流。

三相循环电流之间有如式 5 的关系, 利用非故障相的差电流, 可以求得 a 相循环电流, 从而加以补偿。

由式 5 可得:

$$\dot{I}_{ae} = \frac{1}{2} \left(\frac{n_a}{n_a} \dot{I}_{be} + \frac{n_c}{n_a} \dot{I}_{ce} \right) = \frac{1}{4n_a} (n_b \dot{I}_{bs} + n_c \dot{I}_{cs}) \quad (6)$$

因此, 输入继电保护装置的故障相(a相)电流可以按式 7 进行补偿。

$$\dot{I}_a^{\text{in}} = \dot{I}_a - \dot{I}_{ae} = \dot{I}_a - \frac{1}{4n_a} (n_b \dot{I}_{bs} + n_c \dot{I}_{cs}) \quad (7)$$

非故障相的电流可以按式 8 的形式补偿。

$$\dot{I}_b^{\text{in}} = \dot{I}_b - \frac{1}{2} \dot{I}_{bs}, \quad \dot{I}_c^{\text{in}} = \dot{I}_c - \frac{1}{2} \dot{I}_{cs} \quad (8)$$

* 零序电流的补偿

$$3\dot{I}_o^{\text{in}} = 3\dot{I}_o - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{n_b}{2n_a} + 1 \right) \dot{I}_{bs} + \left(\frac{n_c}{2n_a} + 1 \right) \dot{I}_{cs} \right] \quad (9)$$

* 故障相差电流的补偿:

$$\dot{I}_{as}^{\text{in}} = \dot{I}_{as} - 2\dot{I}_{ae} = \dot{I}_{as} - \frac{1}{2n_a} (n_b \dot{I}_{bs} + n_c \dot{I}_{cs}) \quad (10)$$

* 零序差电流的补偿:

$$3\dot{I}_{os}^{\text{in}} = 3\dot{I}_o - \left(\frac{n_b}{2n_a} + \frac{2n_b}{n_c} \right) \dot{I}_{bs} - \left(\frac{n_c}{2n_a} + \frac{2n_c}{n_b} \right) \dot{I}_{cs} \quad (11)$$

2.1.2 被感应线路发生相间短路故障

若被感应线路发生三相短路故障, 则各相电流可以用各分量表示为

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_{ae} + \dot{I}_{aL} + \dot{I}_{af} \\ \dot{I}_b = \dot{I}_{be} + \dot{I}_{bL} + \dot{I}_{bf} \\ \dot{I}_c = \dot{I}_{ce} + \dot{I}_{cL} + \dot{I}_{cf} \end{cases} \quad (12)$$

式中 \dot{I}_{aL} 、 \dot{I}_{bL} 、 \dot{I}_{cL} 为负荷分量电流, 有: $\dot{I}_{aL} + \dot{I}_{bL} + \dot{I}_{cL} = 0$

\dot{I}_{af} 、 \dot{I}_{bf} 、 \dot{I}_{cf} 为故障分量电流, 有: $\dot{I}_{af} + \dot{I}_{bf} + \dot{I}_{cf} = 0$

若被感应线路发生两相短路(a、b相), 则各相电流可以用各分量表示为

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_{ae} + \dot{I}_{aL} + \dot{I}_{af} \\ \dot{I}_b = \dot{I}_{be} + \dot{I}_{bL} + \dot{I}_{bf} \\ \dot{I}_c = \dot{I}_{ce} + \dot{I}_{cL} \end{cases} \quad (13)$$

由故障边界条件有: $\dot{I}_{af} + \dot{I}_{bf} = 0$

因此, 当被感应线路发生相间短路故障时, 各相电流可按式 14 进行循环电流的补偿。

$$\begin{cases} \dot{I}_a^{\text{in}} = \dot{I}_a - \frac{1}{n_a} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \\ \dot{I}_b^{\text{in}} = \dot{I}_b - \frac{1}{n_b} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \\ \dot{I}_c^{\text{in}} = \dot{I}_c - \frac{1}{n_c} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \end{cases} \quad (14)$$

经过补偿后的各相电流 \dot{I}_a^{in} 、 \dot{I}_b^{in} 、 \dot{I}_c^{in} 均只剩下负荷分量和故障分量的电流。

2.2 被感应线正常运行时的补偿

感应线路正常运行时: $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, 且各相负荷电流数值不大, 被感应线双回线运行时循环电流相对较小。但是, 当感应线路故障时, 各相短路电流不对称, 且数值较大, 由表 1 的计算结果可见: 被感应线路中流过的循环电流大为提高。这样由于较大的循环电流作用, 有可能造成原有的继电保护装置误动作。为此, 当被感应线路没有故障时, 可按式 15, 对输入继电保护装置的电流进行循环电流的补偿。

$$\begin{cases} \dot{I}_a^{\text{in}} = \dot{I}_a - \dot{I}_{ac} = \dot{I}_a - \frac{1}{2} \dot{I}_{as} \\ \dot{I}_b^{\text{in}} = \dot{I}_b - \dot{I}_{bc} = \dot{I}_b - \frac{1}{2} \dot{I}_{bs} \\ \dot{I}_c^{\text{in}} = \dot{I}_c - \dot{I}_{cc} = \dot{I}_c - \frac{1}{2} \dot{I}_{cs} \end{cases} \quad (15)$$

3 结论

线与线之间的电磁耦合, 造成的电磁感应电压的大小, 主要决定于感应线路的电流大小及导线的并架结构。

被感应线双回线并列运行时, 由于两条线上的电磁感应电压大小不同, 闭合回路中将产生循环电流, 其大小决定于两条线路电磁感应电压的差值及导线参数, 且循环电流含有较大的零序分量。

根据采集得到的各相电流, 经过一定的运算, 可以实现对循环电流的补偿, 以实现继电保护装置的正确动作。

参考文献

- 1 古川英夫. 多回线并架で生じトラデルは, 电气计算, 1985 年 4 月
- 2 甲斐隆章等. デジタル形零相循环电流对策付回线选择保护继电装置, 明电时报, 1986. 3
- 3 林政义等. 多回线并架送电線の異常現象と最近の抑制技術. 电气计算, V01. 40 No. 2
- 4 Takaki I, NEW BALANCE GROUND RELAYING WITH COUNTERMEASURE AGAINST ZERO-PHASE-SEQUENCE CIRCULATING CURRENT, IEE PAS VOL PAS- 100, NO5 MAY 1981
- 4 关根泰次著. 蒋建民等译. 电力系统暂态解析论. 机械工业出版社, 1989

RELAY

Vol. 25 No. 5

Oct 1997

CONTENTS AND ABSTRACTS (Partial)

THEORETICAL STUDY AND APPLICATION

Research on the Expert System of Setting Calculation for Zero- Sequence Current Protection of HV network **Chen Yonglin et al(1)**

Applying expert system theory and intelligent program designing method and combining conventional setting calculation of zero- sequence current protection, an expert system of setting calculation for zero- sequence current protection has been developed. The system better realizes the effective combination of value calculation and logic inference and is easy for realization of the expert system's behaviour. By practical calculation, its result can satisfy the requirement.

Keywords: Setting calculation of protective relay Expert system

Parallel Multiloop Transmission Lines Produce Circulating Current and its Compensation **Wei Gang, Zhang Yichen (6)**

This paper discusses when parallel multiloop transmission lines may result in induced voltage and circulating current. The EMTP program is used to compute model system. The method for compensation of circulating current is discussed and the method is effective for distortionless operation of protective relays.

Keywords: Multiloop transmission line Parallel Circulating current Compensation

Discussion on the Problems Existing in Phase- Comparison Pilot Relay **Yang Chuenming et al(11)**

After analyzing the problems of analog phase- comparison pilot relays that run in our power system, this paper discusses some difficulties when realizing digital phase- comparison relay according to the approach of realizing analog phase- comparison relay. In the same time, the paper analyzes the existing problems of power line carrier and provides the corresponding resolving method. Some foundation viewpoints for the design of new type digital phase- comparison relay are presented.

Keywords: Phase- comparison pilot relay Microprocessor- based protective device Power line carrier communication system

A New Approach of Evaluating Phasor Mode **Zhou Dam in (15)**

A new approach of evaluating phasor mode is presented in this paper. Contrasting with other methods, the approach is of higher approaching accuracy, and in four subdivisions its maximum error is less than $7.87510^{-3}\%$. Thus it is of higher practical value in microprocessor- based protective and control devices.

Keywords: Evaluating phasor mode Approach

A Kind of Approach for Judging Metal- Fault **Cui Jingan Wang Anding (18)**

A kind of approach for judging metal- fault is presented basing on the practical case that majority of locating algorithms from single- end can evaluate accurate fault distance at metal fault or short- circuit with less transient resistance. The approach is tested using EMTP and its result proves the approach is correct.

Key words: Fault HV transmission line Short- circuit

NEW TECHNIQUE AND SCHEME

Initial Discussion on Transmitting Protection Signal on Power- Line Carrier in Multi- Purpose Mode **Jiang Lin in (21)**

A kind of HF protection communication- "transmitting audio protection signal on PLC in multi- purpose mode" is discussed in this paper. Because of increasing shortage of carrier frequency on power network, demand on using channel in multi- purpose mode is increasing strongly. Using PLC to transmit protection signal is an economic and reliable transmission mode, no matter now or in the future. Transmitting audio protection signal on PLC in multi- purpose mode belongs in 'edge science' between communication field and protection field and needs engineers of the two fields to make research together.

Keywords: PLC Teleprotection Simultaneous multi- purpose Alternative multi- purpose

The New Microprocessor- Based Overload Protection Scheme of Motor through Accumulated Stator Current **Xu Lei, Xu Xianrong (27)**