

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181445

基于 Carson 理论和 EMTP 的 220 kV 多回电缆线路 电气参数及不平衡度分析

林桂辉¹, 朱鹏宇², 王 灿², 冯伯庚¹, 廖雁群¹, 杨锐雄¹, 甘德树¹, 吴海雄¹, 廖石江¹

(1. 广东电网公司珠海供电局, 广东 珠海 519000; 2. 哈尔滨工业大学(深圳), 广东 深圳 518055)

摘要: 为分析珠澳电网 220 kV 电缆线路电磁不平衡问题, 应用理论计算(Carson 理论)与仿真(EMTP)相结合的方法。首先, 对“导线—大地”回路与 Carson 线路理论得到的线路阻抗矩阵与 EMTP 仿真得到的线路阻抗矩阵进行对比。然后, 利用 EMTP 搭建的完整实际线路模型, 分析了不同因素对线路电气参数的影响程度。最后根据电磁不平衡度理论计算了相间距离、护套交联方式及相序排列 3 个因素对电缆线路的影响。结果表明: Carson 线路模型在分析线路阻抗时误差很小与 EMTP 基本吻合; 电缆金属护套交联和接地电阻对电缆序阻抗有一定影响; 相间距离和金属护套交联影响线路负序不平衡度; 在研究的这条珠澳电缆线路里, 当采取 ABC/CBA 相序排布时线路的电磁不平衡度可以达到最低。

关键词: 电缆线路; 阻抗矩阵; 序阻抗; 电磁不平衡度

Analysis of electrical parameters and unbalance factors of 220 kV multi-circuit transmission cable based on Carson theory and EMTP simulation

LIN Guihui¹, ZHU Pengyu², WANG Can², FENG Bogeng¹, LIAO Yanqun¹, YANG Ruixiong¹,
GAN Deshu¹, WU Haixiong¹, LIAO Shijiang¹

(1. Zhuhai Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai 519000, China;
2. Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China)

Abstract: To analyze the electromagnetic unbalance factor of 220 kV transmission cable line in Zhuhai-Macao Power Grid, this paper applies a method which incorporates Carson theory and electromagnetic transient simulation (EMTP) simulation technique. Firstly, the comparison of cable impedances derived from Carson theory and EMTP simulation is conducted. Then, according to the EMTP simulation model from one practical transmission cable line, impact factors of cable electrical parameters are analyzed. At last, calculations from three different factors (distance between phases, cross-bonding mode of metal sheath and arrangement of phases) are made to obtain the main cable electromagnetic unbalance factor. Results show that there only exists small cable line impedance errors between the Carson model and EMTP analysis. Analyses demonstrate that the metal sheath cross-bonding and ground resistance of the cable would partly impact the cable sequence impedance. The metal sheath cross-bonding and the distance between phases show great influence on the negative-sequence unbalance factor. For the analyzed transmission cable line between Zhuhai and Macao, when using ABC/CBA cable arrangement, the electromagnetic unbalance could be the minimum.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51707047), Science and Technology Program of Guangdong Power Grid Co. (No. GDKJQQ20161098), and Science and Technology Project of Shenzhen (No. JCYJ20170811154143968).

Key words: cable lines; impedance matrix; sequence impedance; electromagnetic unbalance

0 引言

随着城市经济及建设的快速发展, 其用电量增

加十分迅速, 而城市的土地供应日益紧张, 这种状况给城市供电系统提出了严峻的挑战。电力电缆因其不占地上空间、变电站出线走廊宽度较小、供电可靠性高等优点备受城市电网青睐并越来越多地应用于电网的建设当中^[1]。对于 220 kV 等级的电缆, 其多数设于地下电缆沟中, 当输电线路是多回的情况时一般采用同沟平行敷设, 这使得不同电缆线路

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51707047); 广东电网有限责任公司科技项目资助(GDKJQQ20161098); 深圳市科技计划项目资助(JCYJ20170811154143968)

之间有复杂的电磁耦合关系。由于电缆沟空间较小, 所以当电缆空间排列不对称时会发生线路参数三相不平衡问题。线路参数的平衡性影响着电网的安全运行^[2], 例如, 参数不平衡所产生的负序电流可能导致发电机的负序保护动作, 从而引发电机跳闸, 或是损坏系统中的一些用电设备^[3]。因此, 对线路参数平衡性的分析对电网安全运行有着重要意义。

当前对于输电线路的不平衡度分析多基于架空线路^[4-7]及其保护措施^[8-10], 对地下电缆尤其是多回电缆线路的电气参数及其不平衡度的研究较少。电缆线路因其含有金属护套、金属护套处理方式多样等多种因素使其电气参数及其不平衡度研究的复杂程度要高于架空线路, 因此需要有一套完整的理论去对电缆线路参数的不平衡度进行评估分析。

本文采用理论与仿真相结合的方法, 考虑了可能影响电力电缆参数不平衡的多方面因素(相间距离、护套交叉互联、芯线交叉互联、相序排列、护套接地电阻等)。通过 Carson 线路模型“单导线—大地回路”方法以及采用电磁暂态仿真程序(EMTP)对一条珠澳电网 220 kV 多回电缆线路进行了电气参数及其不平衡度分析。

1 多回电缆参数计算

在此之前曾有相关文献对于电缆线路参数计算的几种方法进行了讨论^[11-12], 结果说明 Carson-Clem 公式在准确性和通用性方面是最优, 采用此方法可以为电缆的后续研究提供准确、可靠的电缆参数。

1.1 电缆阻抗矩阵计算

“导线—大地”回路如图 1 所示。导线 aa 与大地平行, 导线中流过电流 I_a , 经由大地返回。设大地体积无限大, 且具有均匀的电阻率, 则地中电流就会流经一个很大的范围, 这种“单导线—大地”的交流电路可以用卡松(Carson)线路来模拟^[13]。卡松线路就是用一虚拟导线 ee 作为地中电流的返回导线, 与 aa 的距离为 D_{ae} , D_{ae} 是关于大地电阻的函数, 选择适当的值, 可使这种线路计算所得的电感值与试验测得的值相等。

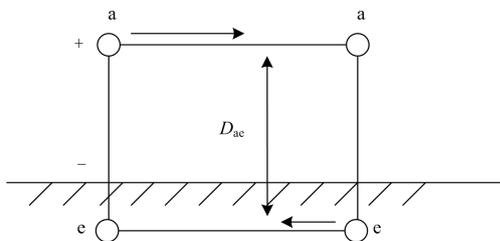


图 1 “单导线—大地”回路

Fig. 1 Single conductor-earth circuit

通过上述模型理论以及推导可以得到芯线自阻抗^[14](单位 Ω/km)为

$$Z_{aa} = (r_c + r_g + j0.1445 \lg \frac{D_e}{G_s}) \quad (1)$$

式中: r_c 代表单位长度芯线的电阻; r_g 代表单位长度大地的等值电阻; D_e 代表虚拟导线的等值深度; G_s 为电缆芯线的几何平均半径。

当两根导线相平行时, 可以得到两条平行导线的互阻抗(单位 Ω/km)为

$$Z_{ab} = (r_g + j0.1445 \lg \frac{D}{D}) \quad (2)$$

式中, D 为 AB 两相轴线间距离。

金属护套是电力电缆线路不同于架空线路的一个特征, 在处理金属护套时应将其等效为一相“导体”。因此金属护套的自阻抗(单位 Ω/km)为

$$Z_{ax} = (r_s + r_g + j0.1445 \lg \frac{D_e}{D'_s}) \quad (3)$$

式中, D'_s 为金属护套的几何平均半径。

对于护套间互阻抗采取式(2)相同的方法, 即(单位 Ω/km)

$$Z_{xy} = (r_g + j0.1445 \lg \frac{D_e}{D_{12}}) \quad (4)$$

式中, D_{12} 为 A 相金属护套与 B 相金属护套之间的距离。芯线与护套之间的互感也采用上述方法, 即(单位 Ω/km)

$$Z_{ay} = (r_g + j0.1445 \lg \frac{D_e}{D_{12}}) \quad (5)$$

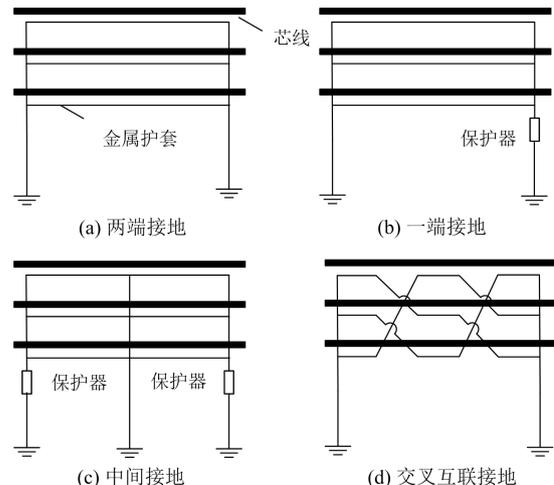


图 2 金属护套接地方式

Fig. 2 Grounding modes of metal sheath for cable

实际工程中金属护套的处理上不同的线路条件也会有不同的做法^[15], 如图 2 所示, 文献[16]也分析了不同的接地方式下电缆序阻抗的变化, 在本文

中也有一些涉及。对于海底电缆往往还多一层铠装处理方式更加多样^[17]本文不做过多研究。

对于一条经过等距交叉互联并接地的电缆线路来说具有如下关系^[18]:

$$\begin{cases} Z'_{ax} = Z'_{ay} = Z'_{az} = (Z_{ax} + Z_{ay} + Z_{az})/3 \\ Z'_{bx} = Z'_{by} = Z'_{bz} = (Z_{bx} + Z_{by} + Z_{bz})/3 \\ Z'_{cx} = Z'_{cy} = Z'_{cz} = (Z_{cx} + Z_{cy} + Z_{cz})/3 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} Z'_{xx} = Z'_{yy} = Z'_{zz} = (Z_{xx} + Z_{yy} + Z_{zz})/3 \\ Z'_{xy} = Z'_{xz} = Z'_{yz} = (Z_{xy} + Z_{xz} + Z_{yz})/3 \end{cases} \quad (7)$$

依据式(6)和式(7)可以进一步推出等距交叉互联后的电缆参数(单位 Ω/km)为

$$Z'_{ax} = r_g + j0.1445 \lg \frac{D_e}{\sqrt[3]{D'_s + D_{12} + D_{13}}} \quad (8)$$

$$Z'_{xy} = r_g + j0.1445 \lg \frac{D_e}{\sqrt[3]{D_{12} D_{13} D_{23}}} \quad (9)$$

通过式(1)~式(9)可得到完整的电缆线路阻抗矩阵。

1.2 序阻抗参数计算

本文将每一条线路的护套也等效于一根导体,在电缆沟中不仅仅有一回线路因此要考虑到耦合的问题将进行一个多回电缆的序阻抗计算^[19],首先列阻抗矩阵式子,如式(10)所示。

$$\begin{bmatrix} U_{a1} \\ U_{b1} \\ U_{c1} \\ U_{as1} \\ U_{bs1} \\ U_{cs1} \\ \vdots \\ U_{an} \\ U_{bn} \\ U_{cn} \\ U_{asn} \\ U_{bsn} \\ U_{csn} \end{bmatrix} = Z \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \\ I_{as1} \\ I_{bs1} \\ I_{cs1} \\ \vdots \\ I_{an} \\ I_{bn} \\ I_{cn} \\ I_{asn} \\ I_{bsn} \\ I_{csn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据护套的连接方式不同后续会有不同的处理方法,对于文中线路均是交叉互联后接地,那么依据该条件可以得出

$$\begin{cases} U_{a1} = U_{a2} = \dots = U_{an} \\ U_{b1} = U_{b2} = \dots = U_{bn} \\ U_{c1} = U_{c2} = \dots = U_{cn} \\ U_{asi} = U_{bsi} = U_{csi} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

根据式(11)可将式(10)进行化简,得到式(12)。

$$U'_{3n \times 1} = \begin{bmatrix} U_{a1} \\ U_{b1} \\ U_{c1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = Z'_{3n \times 3n} I_{3n \times 1} \quad (12)$$

去除零项后可以得到第一回路电流方程^[20]为

$$\begin{bmatrix} I_{cA1} \\ I_{cB1} \\ I_{cC1} \end{bmatrix} = (Z'_{3 \times 3})^{-1} \begin{bmatrix} U_{cA1} \\ U_{cB1} \\ U_{cC1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

对 $(Z'_{3 \times 3})^{-1}$ 求逆即得到第1回线路的综合阻抗矩阵为

$$Z_1 = [(Z'_{3 \times 3})^{-1}]^{-1} \quad (14)$$

得到综合阻抗矩阵之后根据序阻抗变换原理即可变换为序阻抗矩阵。

这种计算序阻抗的方法为公式估算法^[18],该方法忽略了接地电阻的影响,适用于接地电阻较小的场合,可以通过推导之后的公式计算得到正序阻抗和零序阻抗,如式(15)所示。

$$\begin{cases} Z_0 = Z_{aa} + 2Z_{ab} - \frac{(Z_{ax} + 2Z_{ay})^2}{Z_{xx} + 2Z_{xy}} \\ Z_1 = Z_{aa} - Z_{ab} - \frac{(Z_{ax} - Z_{ay})^2}{Z_{xx} - Z_{xy}} \end{cases} \quad (15)$$

从式(15)可以看到对于芯线换位或者金属护套交叉互联的情况下 $Z_{ax} = Z_{ay}$,因此 $Z_1 = Z_{aa} - Z_{ab}$,电缆线路正序阻抗增大。

2 EMTP 计算电缆参数与理论计算对比

根据第一章的分析可以得到一个阻抗矩阵,在电磁暂态仿真程序(EMTP)中也可以通过搭建相应空间排布的电缆来获得对应的阻抗矩阵,通过二者的对比可以验证仿真计算与理论计算的正确性,使后面的仿真计算以及理论计算更具说服力。

在珠澳电网中 220 kV 电缆大多采用的电缆型号为 YJLW02-Z 127/220 kV 1×2500 其主要尺寸结构如表 1 所示。

本文涉及到的电缆线路为珠澳电网其中一条电缆沟,此线路长约 7 km 分为 14 个小段,其中有电缆沟、排管、顶管等多种排布方式,其主要的排布方式如图 3 所示。

表 1 YJLW02-Z 127/220 kV 1×2500 型电缆主要尺寸

Table 1 Parameters of YJLW02-Z 127/220 kV 1×2500 cable lines

电缆结构		参数
导体	材料	Cu
	导体截面/mm ²	2 500
	导体直径/mm	60.4
	半导体层平均厚度/mm	0.8
	材料	XLPE
绝缘	绝缘外径/mm	113
	绝缘屏蔽层外径/mm	115
防水带	防水带厚度/mm	6.6
护套	材料	Al
	金属护套厚度/mm	3.2
	金属护套外径/mm	149.2
外护层	材料	PE
	外护套厚度/mm	5
	外护套外径/mm	159.2

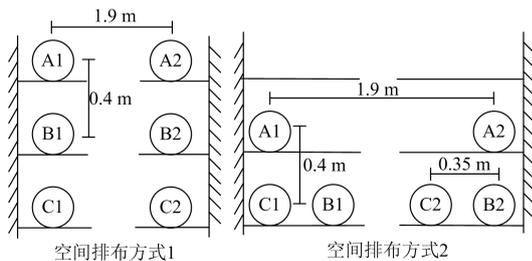
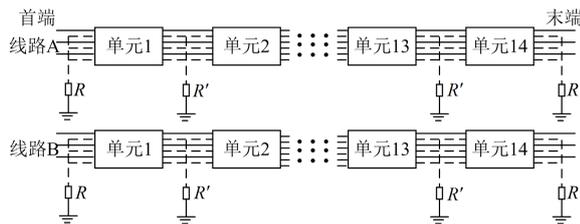


图 3 珠澳电缆线路的几种典型排布图

Fig. 3 Several typical cable arrangements in Zhuhai-Macao Grid

此电缆沟中含有双回电缆线路, 通过计算可以得到这 3 种典型排布方式的阻抗矩阵, 在线路中电阻部分均可以通过厂家所给交流电阻值获得, 大地等值电阻多取 $0.05 \Omega/\text{km}$, 因此本文中只关注电抗矩阵的大小。因为此矩阵较大(12×12), 故仅展出空间排布较为复杂的空间排布方式 3 的理论计算阻抗矩阵和仿真计算阻抗矩阵如下, 第一个为仿真计算

的阻抗矩阵, 第二个为理论计算的阻抗矩阵, 单位为 Ω/km 。

0.6523
0.4558 0.6523
0.4828 0.5196 0.6523
0.3983 0.3862 0.3858 0.6523
0.3976 0.3858 0.3863 0.5169 0.6523
0.4133 0.3983 0.3976 0.4558 0.4828 0.6523
0.5994 0.4558 0.4828 0.3983 0.3976 0.4133 0.5972
0.4558 0.5994 0.5169 0.3862 0.3858 0.3983 0.4558 0.5972
0.4828 0.5169 0.5995 0.3858 0.3863 0.3976 0.4828 0.5169 0.5973
0.3983 0.3862 0.3858 0.5994 0.5169 0.4558 0.3983 0.3862 0.3858 0.5972
0.3976 0.3858 0.3863 0.5169 0.5995 0.4828 0.3976 0.3858 0.3863 0.5169 0.5973
0.4133 0.3983 0.3976 0.4558 0.4828 0.5994 0.4133 0.3983 0.3976 0.4558 0.4828 0.5972
0.6688
0.4494 0.6688
0.4864 0.5205 0.6688
0.4021 0.3900 0.3895 0.6688
0.4017 0.3895 0.3900 0.5205 0.6688
0.4170 0.4021 0.4017 0.4994 0.4864 0.6688
0.5964 0.4994 0.4864 0.4021 0.4017 0.4170 0.5964
0.4994 0.5964 0.5205 0.3900 0.3895 0.4021 0.4994 0.5964
0.4864 0.5205 0.5964 0.3895 0.3900 0.4017 0.4864 0.5205 0.5964
0.4021 0.3900 0.3895 0.5964 0.5205 0.4994 0.4021 0.3900 0.3895 0.5964
0.4017 0.3895 0.3900 0.5205 0.5964 0.4864 0.4017 0.3895 0.3900 0.5205 0.5964
0.4170 0.4021 0.4017 0.4994 0.4864 0.5964 0.4170 0.4021 0.4017 0.4994 0.4864 0.5964

从上面两个矩阵看到误差很小(小于 $0.02 \Omega/\text{km}$)误差多为芯线和金属护套的平均几何半径的取值、虚拟导线等值深度等方面的取值有些不准确, 但从整体上看理论计算和仿真计算都具有很高的精度可以作为分析手段。

3 电缆电气参数及不平衡度分析

3.1 接地电阻对电缆序阻抗的影响

金属护套的接地电阻在工程设计中是很重要的一环, 在工程中往往取一个规定范围内的数值, 采用 EMTP 可以分析在接地电阻变化时线路的正序阻抗与零序阻抗的变化程度, 本文以线路 B 为例, 对首末电阻值以及中间电阻值调整观察序阻抗变化。如表 2 所示, 可以看到, 金属护套中间的接地电阻对零序阻抗影响较小, 两端的接地电阻对于零序阻抗影响明显。接地电阻的变化对正序阻抗的大小变化影响很小。

表 2 金属护套接地电阻对电缆线路序阻抗影响

Table 2 Impact of grounding resistance of metal sheath on sequence parameters of the cable lines

金属护套接地方式	接地电阻/ (Ω/km)		零序 电阻/ (Ω/km)	零序 电抗/ (Ω/km)	正序 电阻/ (Ω/km)	正序 电抗/ (Ω/km)
	首/末	中间				
金属护套交叉	0.1	10	0.134 7	0.073 3	0.032 0	0.155 3
金属护套交叉	0.1	3	0.133 5	0.073 1	0.032 0	0.155 3
金属护套交叉	0.1	0.1	0.117 0	0.076 7	0.031 9	0.155 9
金属护套交叉	1	10	0.554 1	0.416 2	0.036 7	0.156 1
金属护套交叉	5	10	0.685 6	1.206 0	0.037 4	0.156 2
金属护套交叉	10	10	0.550 2	1.417 6	0.037 9	0.156 2

3.2 金属护套交叉互联对序阻抗的影响

在线路 A 和线路 B 两种空间排布方式下分析了金属护套交叉互联, 芯线换位两种接线方式对电缆

线路序阻抗的影响,如表3所示。在表中可以看到芯线换位与金属护套交叉互联这两种方式与未做任何处理的情况主要体现在正序阻抗的差异上。

表3 线路 A、B 的序阻抗参数

Table 3 Sequence impedance of cable A and B

线路名称	接线方式	零序电阻/ (Ω/km)	零序电抗/ (Ω/km)	正序电阻/ (Ω/km)	正序电抗/ (Ω/km)
线路 A	芯线换位	0.134 0	0.073 2	0.016 3	0.158 3
	护套交叉	0.134 7	0.073 3	0.032 0	0.155 3
	护套未交叉	0.134 6	0.073 4	0.020 2	0.051 9
线路 B	芯线换位	0.134 6	0.073 5	0.015 2	0.157 5
	护套交叉	0.134 7	0.073 3	0.026 6	0.164 9
	护套未交叉	0.134 6	0.073 5	0.020 3	0.052 0

3.3 相间距离对电磁不平衡度的影响

电缆线路每一相之间的距离远近是影响线路间电磁耦合的重要因素,导体流过电流时在导体内部及其周围产生磁场,通过相互之间的电磁耦合会对线路阻抗产生影响。电磁不平衡度是衡量线路不平衡的一个重要指数^[21],对于单回线路多采用零序电磁不平衡度和负序电磁不平衡度来表征线路的不平衡程度,如式(16)所示。表4给出了在空间排布方式1的情况下线路A各相间距离变化时负序和零序电磁不平衡度的变化。

$$M_0 = \left| \frac{Z_{01}}{Z_0} \right| \times 100 \quad M_2 = \left| \frac{Z_{21}}{Z_1} \right| \times 100 \quad (16)$$

$$Z_1 = \frac{1}{3}(Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc}) - \frac{1}{3}(Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{bc})$$

$$Z_0 = \frac{1}{3}(Z_{aa} + Z_{bb} + Z_{cc}) - \frac{2}{3}(Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{bc})$$

$$Z_{21} = \frac{1}{3}(Z_{aa} + aZ_{bb} + a^2Z_{cc}) + \frac{2}{3}(a^2Z_{ab} + aZ_{ac} + Z_{bc})$$

$$Z_{01} = \frac{1}{3}(Z_{aa} + a^2Z_{bb} + aZ_{cc}) + \frac{2}{3}(aZ_{ab} + a^2Z_{ac} + Z_{bc}) \quad (17)$$

表4 不同相间距离下电缆线路的电磁不平衡度

Table 4 Electromagnetic unbalance of cable lines with different distances between phases

线路名称	距离/m	零序电磁 不平衡度/%	负序电磁 不平衡度/%
线路 A	0.4	0.11	2.45
	1	0.11	0.84
	5	0.11	0.44
	10	0.11	0.38

从表4中可以看到,改变相间距离对于负序电磁不平衡度影响明显,对于零序电磁不平衡度基本上没有影响。

3.4 金属护套交叉互联对电磁不平衡度的影响

在本次研究的220 kV电缆线路中均采用金属护套交叉互联接地方式,在不同的条件下金属护套的处理方式不同,因此芯线或者护套的换位情况对于线路不平衡度的影响是一个需要研究的内容。表5给出了在金属护套以及芯线不同的处理方式时线路A的零序和负序的不平衡度。

表5 金属护套交叉互联时电缆线路的电磁不平衡度

Table 5 Electromagnetic unbalance of cable lines with different cross-bonding modes of metal sheath

空间排布方式	接线方式	零序电磁 不平衡度/%	负序电磁 不平衡度/%
方式 1	芯线换位	0	0
	护套交叉	0.34	15
	护套未交叉	0.11	2.45
方式 2	芯线换位	0	0
	护套交叉	0.15	8.47
	护套未交叉	0.11	1.54

从表5中可以看到芯线均匀换位时电缆基本上没有电磁不平衡,在仅金属护套交叉互连时负序电磁不平衡度明显增加,

3.5 相序排列对电磁不平衡度影响

因为实际的电缆沟中往往存在着双回或者多回电缆线路,回路之间的不同相序排列电磁不平衡度往往不同。平行双回路有两种不平衡状况^[22],第一种为直通型不平衡,这种类型的不平衡在短路状态下变大;第二种为环流型不平衡,它不受负荷的影响。在双回电缆线路首端施加正序电压,末端三相相对地短路,零序和负序的直通型电磁不平衡度 M_{0T} 和 M_{2T} 、零序和负序环流型电磁不平衡度 M_{0C} 和 M_{2C} 分别定义为

$$M_{0T} = \frac{I_{01} + I_{0II}}{I_{11} + I_{1II}}, \quad M_{2T} = \frac{I_{21} + I_{2II}}{I_{11} + I_{1II}} \quad (18)$$

$$M_{0C} = \frac{I_{01} - I_{0II}}{I_{11} + I_{1II}}, \quad M_{2C} = \frac{I_{21} - I_{2II}}{I_{11} + I_{1II}} \quad (19)$$

式中, I_{01} 、 I_{11} 、 I_{21} 、 I_{0II} 、 I_{1II} 、 I_{2II} 分别为末端短路时回路I和回路II首端电流的零序、正序、负序分量。

在搭建的双回电缆线路模型中线路A相序不发生变化,线路B依次变化,测得零序和负序电磁不平衡度如表6所示。

从表6中可以看到在ABC/CBA排布方式下不平衡度相对较小,究其原因,因为垂直排列的双回电缆线路逆向序排布时不平衡度最小^[23],在此线路空间排布方式1占整个线路全长一半以上,因此综合起来还是在ABC/CBA排布下该线路不平衡度最

小, 对以后规划线路相序排布具有指导意义。

表 6 相序排布方式不同时电缆线路的电磁不平衡度

Table 6 Electromagnetic unbalance of cable lines with different arrangements of phases

相序排列	$M_{0T}/\%$	$M_{2T}/\%$	$M_{0C}/\%$	$M_{2C}/\%$
ABC/ABC	0.26	8.68	1.42	2.95
ABC/ACB	0.18	3.75	2.23	8.04
ABC/BAC	0.08	5.55	1.89	6.95
ABC/BCA	0.08	6.51	1.13	5.81
ABC/CAB	0.18	1.41	3.32	8.70
ABC/CBA	0.25	8.34	0.05	1.07

4 结论

本文以珠海电网当中某条 220 kV 多回电缆线路为研究对象, 通过理论计算与仿真分析得出以下结论:

1) Carson 线路模型具有良好的准确性, 当计算多回电缆序阻抗参数时将金属护套等效为导体处理是一种考虑到护套影响的方法;

2) 采用电磁暂态仿真程序(EMTP)对电缆线路建模得到的阻抗矩阵与 Carson 理论计算出来的阻抗矩阵十分相近, 误差很小;

3) 电缆线路两端的接地电阻对零序阻抗影响明显, 中间接地电阻对零序阻抗影响较小, 正序阻抗受到接地电阻的影响也较小;

4) 金属护套交叉互联对于电缆序阻抗的影响主要体现在正序阻抗上;

5) 相间距离更多的是影响电缆线路的负序不平衡度, 零序不平衡度基本不变;

6) 芯线均匀换位条件下电磁不平衡度基本为 0, 金属护套交叉互联使电缆负序电磁不平衡度明显增加;

7) 相序排列对多回电缆线路有一定影响, 合理规划相序排列能减少线路不平衡度。

参考文献

[1] 徐玉琴, 杨浩, 李鹏. 不同接地方式电缆型配电网单相接地故障下的可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 41-47.
XU Yuqin, YANG Hao, LI Peng. Reliability evaluation of different grounding cable networks on signal-phase grounding fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 41-47.

[2] 邓星, 蒙绍新, 尹项根, 等. 多回并联电缆线路参数的不对称性分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3119-3124.
DENG Xing, MENG Shaoxin, YIN Xianggen, et al. Analysis on asymmetry of sequence parameters for parallel

multi-circuit cables[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 3119-3124.

[3] DE LEON F, M-ASENSIO M L, A-CORDERO G. Effects of conductor counter-transposition on the positive-sequence impedance and losses of cross-bonded cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 2060-2063.

[4] 韦钢, 黄金生. 同杆并架多回线路参数及不平衡计算[J]. 电网技术, 1998, 22(10): 8-11.
WEI Gang, HUANG Jinsheng. Sequence parameters and unbalance coefficients calculation for parallel multi-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Technology, 1988, 22(10): 8-11.

[5] 韦刚, 张子阳, 房正良, 等. 多回输电线路并架的不平衡性分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(10): 9-11, 41.
WEI Gang, ZHANG Ziyang, FANG Zhengliang, et al. Analysis of imbalance of the parallel multi-circuit transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(10): 9-11, 41.

[6] 闫红艳, 高艳丰, 王继选, 等. 同杆双回线路行波故障测距的关键问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 120-128.
YAN Hongyan, GAO Yanfeng, WANG Jixuan, et al. Research on key problems of traveling wave location of double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 120-128.

[7] 刘前进, 朱庆钢, 罗龙波. 750 kV 同塔双回不换位线路电流不平衡度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 105-110.
LIU Qianjin, ZHU Qinggang, LUO Longbo. Analysis on current imbalance of un-transposed 750 kV double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 105-110.

[8] 杜婉琳, 梁远升, 王钢. 局部耦合双回输电线路故障测距时域算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 59-66.
DU Wanlin, LIANG Yuansheng, WANG Gang. Fault location algorithm based on time-domain for partial coupling double circuit transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 59-66.

[9] HE Jinghan, LIU Lin, DING Fanfan, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 102-110. DOI: 10.1186/s41601-017-0043-3.

[10] ROOSTAEE S, THOMAS M S, MEHFUZ S. Experimental studies on impedance based fault location for long transmission lines[J]. Protection and Control of Modern

- Power Systems, 2017, 2(2): 169-177. DOI: 10.1186/s41601-017-0048-y
- [11] 钱洁. 电力电缆电气参数及电气特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
QIAN Jie. Study on electrical parameter calculation method and electrical characteristics of power cables[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [12] 徐政, 钱洁. 电缆电气参数不同计算方法及其比较[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 689-697.
XU Zheng, QIAN Jie. Comparison of different methods for calculating electrical parameters of power cables[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 689-697.
- [13] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(上册)[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [14] 王雄伟, 张哲, 尹项根, 等. 多回单芯电力电缆并联运行护套感应电压的计算与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 77-84.
WANG Xiongwei, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Calculation and analysis of sheath induced voltage for multi-circuit single-core power cable lines in parallel[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 77-84.
- [15] 杨杰, 周承启, 王磊. 单芯电缆金属护套接地方式比较分析[J]. 陕西电力, 2011, 39(2): 48-51.
YANG Jie, ZHOU Chengqi, WANG Lei. Comparative analysis on metal sheaths grounding modes of single-core cables[J]. Shaanxi Electric Power, 2011, 39(2): 48-51.
- [16] 唐庆华, 刘宝成, 杨洪, 等. 高压电缆金属护套的接地方式对线路参数的影响[J]. 电线电缆, 2009(2): 43-46.
TANG Qinghua, LIU Baocheng, YANG Hong, et al. Effect of the earthing method of the metal sheath in HV cables on parameters[J]. Electric Wire & Cable, 2009(2): 43-46.
- [17] CHIEN C H, BUCKNALL R W G. Harmonic calculations of proximity effect on impedance characteristics in subsea power transmission cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2150-2158.
- [18] 王晓彤, 项祖涛, 班连庚, 等. 500 kV 电缆线路工频参数的计算与分析[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2310-2315.
WANG Xiaotong, XIANG Zutao, BAN Liangeng, et al. Calculation and analysis on power-frequency parameters for 500 kV cable lines[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2310-2315.
- [19] 王育学, 张哲, 尹项根, 等. 平行多回电缆序阻抗参数的计算与分析[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 186-191.
WANG Yuxue, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Calculation and analysis sequence impedance for parallel multi-circuit cable lines[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 186-191.
- [20] 朱迎春, 樊友平, 唐诚. 强不对称互感输电线路序阻抗参数和不平衡性的理论计算与测量研究[J]. 广西电力, 2009, 32(6): 7-13.
ZHU Yingchun, FAN Youping, TANG Cheng. Calculation and measurement of sequence impedance parameters of asymmetry transmission line with mutual inductance[J]. Guangxi Electric Power, 2009, 32(6): 7-13.
- [21] ANDERSON J G. 345 kV 及以上超高压输电线路设计参考手册[M]. 北京: 电力工业出版社, 1981.
- [22] 王晓彤, 林集明, 班连庚, 等. 1 000 kV 同塔双回线路不平衡度及换位方式分析[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 1-5.
WANG Xiaotong, LIN Jiming, BAN Liangeng, et al. Analysis on unbalance factor and transposing modes for 1 000 kV double-circuit transmission line on the same tower[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 1-5.
- [23] 王晓彤, 项祖涛, 宋新立, 等. 采用垂直排列的 500 kV 双回电缆线路参数的不平衡度分析[J]. 高压电器, 2017, 53(2): 132-138.
WANG Xiaotong, XIANG Zutao, SONG Xinli, et al. Analysis on unbalance factor of electrical parameters for 500 kV double-circuit cable line with vertical arrangement[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2): 132-138.

收稿日期: 2018-11-20; 修回日期: 2018-12-29

作者简介:

林桂辉(1980—), 男, 学士, 工程师, 研究方向为电网调度运行、电力系统分析、无功电压优化调控及电网风向管控; E-mail: double_trees@163.com

朱鹏宇(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电缆不平衡分析、电力系统无功补偿; E-mail: zhupengyu@stu.hit.edu.cn

王 灿(1984—), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为电力电子变换器的建模、控制与仿真、可再生能源并网等。E-mail: can.wang@hit.edu.cn

(编辑 周金梅)