

# 并联电缆负载容量利用率分析

罗楚军<sup>1</sup>, 冯玉雷<sup>2</sup>, 李健<sup>1</sup>, 廖星<sup>1</sup>, 邹睿<sup>2</sup>, 张哲<sup>2</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071;

2. 华中科技大学强磁场工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**将现有电缆与新增电缆并联运行,可充分利用已有电缆的输电容量,是实现低成本扩容的有效方法。但由于并联电缆回路之间耦合影响的差异,可能导致负荷电流在并联电缆间出现不均匀分配,进而降低负载容量利用率。在此背景下,该文从电缆芯线与金属护套构成的多回路电磁耦合基本方程出发,提出一种并联电缆负荷分流的计算方法;并以此为基础,对不同布置形式和相序排列方式下的并联电缆负载容量利用率进行分析,给出并联电缆相序优化排列的应用建议;最后通过数字仿真,验证分析结论的正确性。研究表明,通过合理的相序排列,可有效提升并联电缆负载容量利用率,更好地发挥其输电能力。

**关键词:**并联电缆;负载容量利用率;电流分配;相序排列;接地方式

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.01.014 中图分类号:TM726.4 文章编号:1673-9140(2021)01-0127-10

## Analysis of load capacity utilization for parallel cables

LUO Chujun<sup>1</sup>, FENG Yulei<sup>2</sup>, LI Jian<sup>1</sup>, LIAO Xing<sup>1</sup>, ZOU Rui<sup>2</sup>, ZHANG Zhe<sup>2</sup>

(1. Central Southern China Electric Power Design Institute of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071,

China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Paralleling existing cables with new is an effective way to attain the low-cost capacity expansion, which can make a full utilization of existing cable's transmission capacity. However, due to the difference in coupling effects among parallel cables, the load current may be unevenly distributed to reduce the load capacity utilization. On the background, a load distribution calculation method of parallel cables is proposed in view of the the basic equations of multi-loop electromagnetic coupling between cable conductors and metal sheaths. Then the load capacity utilization of parallel cables with different layouts and phase sequence arrangements are analyzed, and application suggestions of phase sequence optimization of parallel cables are given. At last, the analysis conclusion is verified by a numerical simulation. The results show that the optimized phase sequence arrangements can improve the load capacity utilization of parallel cables effectively and take full advantages of the transmission capacity of cables.

**Key words:** parallel cables; load capacity utilization; current distribution; phase sequence arrangements; grounding mode

电力电缆在城市供电中占据重要地位。近年来,随着城市规模的不断扩大、用电量的不断提高,现有的敷设电缆输电容量难以满足供电需求,越来越多高压单芯电缆采用多回并联运行方式<sup>[1-4]</sup>,其典型结构有共相并联和分相并联2种。受敷设空间所限,多回并联电缆位置较近,电磁耦合作用较强,耦合影响的差异会造成负荷电流在不同回路电缆之间出现不均匀分配,引起电缆负载容量利用率降低,严重时,更会造成电缆过载,危及电缆安全。并联电缆布置形式复杂且相序排列方式多样,负荷分流情况和负载容量利用率也各不相同。因此,有必要研究并联电缆负载容量利用率计算方法,提出改善负载容量利用率的措施,以提高并联电缆的技术经济性,保障电网运行安全。

现阶段,金属护套环流和负荷电流分配是并联电缆载流量研究的热点。文献[5-7]研究了并联电缆金属护套环流计算方法,认为护套环流的存在会降低电缆载流量,但未分析其它因素对电缆载流量的影响;文献[8-10]根据实测电缆载流量,指出负荷电流可能在并联电缆之间出现不均匀分配,将显著降低电缆载流量,但未深入分析;文献[11]针对某些特殊布置形式的并联电缆负荷分流特性进行了研究,给出了有益建议,但普适性不足。此外,迄今针对并联电缆负载容量利用率的专题研究较少,缺乏系统的理论分析和可用的量化计算方法。

针对现有研究的不足,该文根据高压单芯并联电缆的结构特点,充分考虑护套不同接地方式的影响,提出了并联电缆负载容量利用率计算方法。在此基础上,全面分析了电缆布置形式、相序排列方式、金属护套接地方式以及电缆间距等因素对并联电缆负载容量利用率的影响,给出了提高并联电缆负载容量利用率的应用建议。

## 1 负载容量利用率计算方法

并联运行时,各相电缆芯线电压降相等,负荷分流取决于电缆阻抗,而电缆阻抗参数与金属护套接地方式相关。该文首先根据高压单芯电缆的结构特点,计及金属护套的影响,对并联电缆阻抗参数进行了计算。在此基础上,提出了并联电缆负荷分流及负载容量利用率计算方法。

### 1.1 计及护套影响的并联电缆阻抗参数计算

图1给出了实际工程中常见的4种金属护套接地方式<sup>[12-14]</sup>。

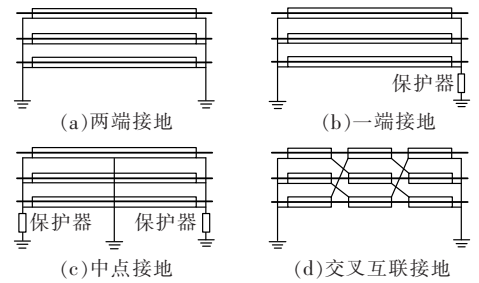


图1 电缆金属护套典型接地方式

Figure 1 Typical grounding modes of cable metal sheath

从图1可以看出,中点接地电缆可以看作共用接地点的2个一端接地电缆;两端接地电缆可看作交叉互联接地电缆的特例<sup>[15]</sup>。为便于后续分析,该文将中点接地和一端接地统一视为一点接地,将两端接地和交叉互联接地统一视为交叉互联接地。

为充分考虑电缆芯线与金属护套之间的电磁耦合,将电缆芯线同金属护套平等看待,均与大地构成“单导线—大地”回路, $n$ 回并联电缆共构成 $6n$ 个“单导线—大地”回路,如图2所示。图中, $U_{ai}$ 、 $U_{awi}$ 、 $I_{ai}$ 和 $I_{awi}$ 分别为第 $i$ 回电缆A相芯线电压降、护套电压降、负荷电流和护套电流( $i$ 取 $1\sim n$ ,表示电缆回数)。

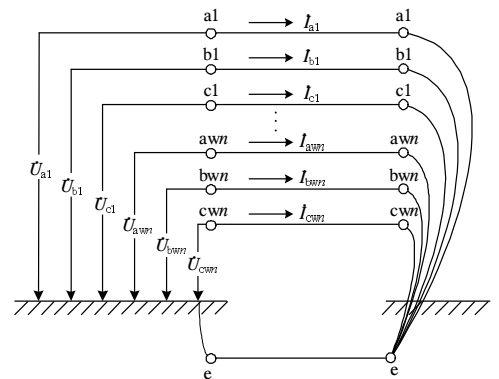


图2  $6n$ 个“单导线—大地”回路

Figure 2  $6n$  “single conductor-ground” circuits

回路阻抗可分为3类:“芯线—大地”回路自阻抗 $Z_{cc}$ 、“护套—大地”回路自阻抗 $Z_{ss}$ 和“芯线—大地”回路与“护套—大地”回路之间的互阻抗 $Z_{sc}$ ,计算公式如下<sup>[15,16]</sup>。

“芯线—大地”回路自阻抗:

$$Z_{cc} = r_c + r_e + j0.144 \, 5 \lg \frac{D_e}{D_c} \quad (\Omega/\text{km}) \quad (1)$$

“护套—大地”回路自阻抗:

$$Z_{ss} = r_s + r_e + j0.144 \, 5 \lg \frac{D_e}{D_s} \quad (\Omega/\text{km}) \quad (2)$$

同一电缆“芯线—大地”回路与“护套—大地”回路之间互阻抗:

$$Z_{sc} = r_e + j0.144 \, 5 \lg \frac{D_e}{D_s} \quad (\Omega/\text{km}) \quad (3)$$

不同电缆“芯线—大地”回路与“护套—大地”回路之间互阻抗:

$$Z_{sc} = r_e + j0.144 \, 5 \lg \frac{D_e}{D} \quad (\Omega/\text{km}) \quad (4)$$

2个“芯线—大地”回路或2个“护套—大地”回路之间互阻抗的计算均为式(4)。

式(1)~(4)中  $r_c$  为芯线单位长度交流电阻;  $r_s$  为护套单位长度交流电阻;  $r_e$  为大地等值电阻,  $r_e = \pi^2 \times 10^{-4} = 0.049 \, 3 \, \Omega/\text{km}$ ;  $D_e$  为以大地为回路时等值回路的深度,  $D_e = 660 \sqrt{\rho_c/f}^{[15-16]}$ ;  $D_c$  为芯线自几何均距;  $D_s$  为护套几何半径;  $D$  为各电缆间距。

需要指出的是,交叉互联接地时,电缆芯线与护套的位置关系随护套换位而改变,计算回路间互阻抗时,应对每一换位段分别计算并累加求和。

## 1.2 并联电缆分流计算

根据图2,列写  $n$  回并联电缆电压降方程:

$$\mathbf{U}_{6n \times 1} = L \mathbf{Z}_{6n \times 6n} \mathbf{I}_{6n \times 1} \quad (5)$$

式中  $\mathbf{U}_{6n \times 1} = [\dot{U}_{a1} \ \dot{U}_{b1} \ \dot{U}_{c1} \ \cdots \ \dot{U}_{awn} \ \dot{U}_{bwn} \ \dot{U}_{cwn}]^T$ ;  $\mathbf{I}_{6n \times 1} = [\dot{I}_{a1} \ \dot{I}_{b1} \ \dot{I}_{c1} \ \cdots \ \dot{I}_{awn} \ \dot{I}_{bwn} \ \dot{I}_{cwn}]^T$ ;  $\mathbf{Z}_{6n \times 6n}$  为并联电缆单位阻抗矩阵,由式(1)~(4)给出,交叉互联接地时,该矩阵为三换位段单位阻抗矩阵的加权均值;  $L$  为电缆长度。

并联运行时,负荷电流等于各同名相电缆芯线电流之和,同时电缆芯线电压降相等,即式(6)、(7)成立:

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \cdots + \dot{I}_{ak} + \cdots + \dot{I}_{an} \\ \dot{I}_b = \dot{I}_{b1} + \cdots + \dot{I}_{bk} + \cdots + \dot{I}_{bn} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_c = \dot{I}_{c1} + \cdots + \dot{I}_{ck} + \cdots + \dot{I}_{cn} \\ \dot{U}_{a1} = \cdots = \dot{U}_{ak} = \cdots = \dot{U}_{an} \\ \dot{U}_{b1} = \cdots = \dot{U}_{bk} = \cdots = \dot{U}_{bn} \\ \dot{U}_{c1} = \cdots = \dot{U}_{ck} = \cdots = \dot{U}_{cn} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $\dot{I}_a$ 、 $\dot{I}_b$  和  $\dot{I}_c$  为 ABC 三相负荷电流。

根据金属护套不同接地方式特点,给出并联电缆负荷分流计算方法。

1) 金属护套一点接地。

护套一点接地时,各护套回路开路,故

$$\begin{cases} \dot{I}_{aw1} = \cdots = \dot{I}_{awk} = \cdots = \dot{I}_{awn} = 0 \\ \dot{I}_{bw1} = \cdots = \dot{I}_{bwk} = \cdots = \dot{I}_{bwn} = 0 \\ \dot{I}_{cw1} = \cdots = \dot{I}_{ckk} = \cdots = \dot{I}_{cwn} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

利用式(8),消去式(5)中护套相关项,电压降方程简化为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{a1} \\ \dot{U}_{b1} \\ \dot{U}_{c1} \\ \vdots \\ \dot{U}_{an} \\ \dot{U}_{bn} \\ \dot{U}_{cn} \end{bmatrix} = L \mathbf{Z}_{3n \times 3n} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{b1} \\ \dot{I}_{c1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{an} \\ \dot{I}_{bn} \\ \dot{I}_{cn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

鉴于不同电缆回路同名相芯线压降相等,将其余回路与第一回路芯线电压降方程做差,得到:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{a1} \\ \dot{U}_{b1} \\ \dot{U}_{c1} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ [0] \end{bmatrix} = L \mathbf{Z}'_{3n \times 3n} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{b1} \\ \dot{I}_{c1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{an} \\ \dot{I}_{bn} \\ \dot{I}_{cn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

将式(10)后  $(3n-3)$  个方程与式(6)联立计算,即可求出各电缆负荷电流。

2) 金属护套交叉互联接地。

交叉互联接地时,电缆三相金属护套星型连接后经电阻接地,护套电压降方程为

$$\begin{cases} \dot{U}_{aw1} = \dot{U}_{bw1} = \dot{U}_{cw1} = (\dot{I}_{aw1} + \dot{I}_{bw1} + \dot{I}_{cw1})(R_{11} + R_{21}) \\ \vdots \\ \dot{U}_{awk} = \dot{U}_{bwk} = \dot{U}_{ckk} = (\dot{I}_{awk} + \dot{I}_{bwk} + \dot{I}_{ckk})(R_{1k} + R_{2k}) \\ \vdots \\ \dot{U}_{awn} = \dot{U}_{bwn} = \dot{U}_{cwn} = (\dot{I}_{awn} + \dot{I}_{bwn} + \dot{I}_{cwn})(R_{1n} + R_{2n}) \end{cases} \quad (11)$$

式中  $R_{1i}$  和  $R_{2i}$  为第  $i$  回电缆金属护套接地电阻 ( $i$  取  $1 \sim n$ , 表示电缆回数)。

将式(5)护套电压降方程减去式(11)同名护套电压降方程, 消去护套电压降, 再利用式(7)消去第一回路外的芯线电压降, 得

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{a1} \\ \dot{U}_{b1} \\ \dot{U}_{c1} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = L Z'_{6n \times 6n} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{b1} \\ \dot{I}_{c1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{awn} \\ \dot{I}_{bwn} \\ \dot{I}_{cwn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

将式(12)后  $(6n-3)$  个方程与式(6)联立计算, 即可求出各电缆负荷分流。

### 1.3 并联电缆负载容量利用率计算

为充分发挥电缆输电能力, 往往将同型号电缆并联运行。假设单回电缆的额定传输功率为  $S_N$ , 则  $n$  回并联电缆理论最大传输功率  $S_{max}$  为  $nS_N$ 。但在实际运行中, 负荷电流的不均匀分配, 会导致并联电缆的实际传输功率  $S_{real}$  小于  $S_{max}$ , 可通过比较  $S_{real}$  与  $S_{max}$ , 反映并联电缆负载容量的利用效率。为此, 定义并联电缆负载容量利用率:

$$\eta = \frac{S_{real}}{S_{max}} \times 100\% \quad (13)$$

各回电缆工作电压相等, 输电功率之比可转化为电流比, 即式(13)等价于

$$\eta = \frac{I_{real}}{nI_N} \times 100\% \quad (14)$$

式中  $I_{real}$  为  $n$  回并联电缆实际载流量;  $I_N$  为单回电缆额定载流量。

为防止电缆过载, 构成并联电缆的多条电缆中仅最大分流电缆的载流量能够达到额定载流, 由于三相负荷电流相等, 该电缆所在相也为并联电缆实际载流量的决定相。对于载流量决定相, 假设第  $i$  回路电缆分流最大, 其负荷电流大小为  $I_{max}$ , 则式(14)可改写为

$$\eta = \frac{I_{max}}{nI_N} \sum_{j=1}^n \frac{I_j}{I_{max}} \times 100\% \quad (15)$$

定义  $k_j = I_j / I_{max}$  为并联电缆各分支电流与最大分支电流的比值, 以下简称分流比。则有:

$$\eta = \frac{I_{max}}{nI_N} \sum_{j=1}^n k_j \times 100\% \quad (16)$$

注意到  $I_{max} = I_N$ , 并联电缆负载容量利用率可表征为

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n k_j \times 100\% \quad (17)$$

分流比与并联电缆负荷电流大小无关, 主要取决于并联电缆的布置形式、相序排列方式以及护套接地方式等因素。显然, 若并联电缆各分支电流相等(均流), 即各电缆分流比均等于 1, 其负载容量利用率将达到最大值 100%。

## 2 并联电缆负载容量利用率分析

并联电缆有不同的布置形式, 以实际中广泛应用的双回路电缆并联运行为例, 典型布置形式包括水平独立、水平两层、垂直两层、品字水平和品字垂直和倒三角垂直等<sup>[17-19]</sup>, 如图 3 所示。对于每种布置形式, 均可通过固定其中一回电缆相序不变并任意排列另一回电缆相序, 形成不同的并联电缆相序排列方式。此外, 电缆回间距  $D$  和同回电缆之间的相间距  $d$  也可能随实际情况作出调整。布置形式、相序排列方式、护套接地方式以及回路间距均可能引起并联电缆负荷分流发生变化, 进而影响负载容量利用率。

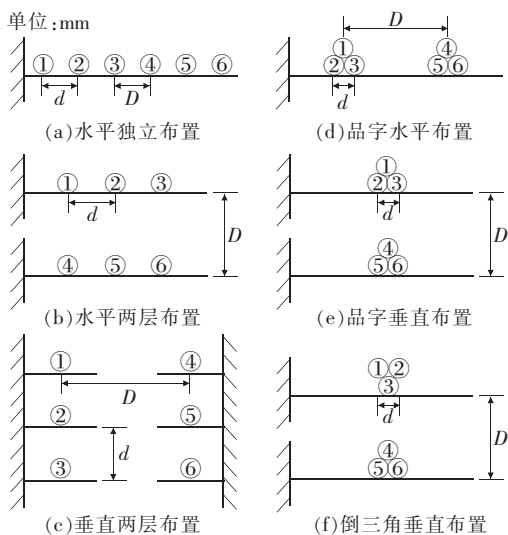


图 3 双回并联电缆典型布置形式

Figure 3 Typical layouts of double-circuit parallel cables

该文以双回电缆并联运行为例, 研究不同布置形式并联电缆负载容量利用率特点。

## 2.1 一点接地并联电缆负载容量利用率分析

对于双回并联电缆,其电压降方程可由式(9)取回路数为 2 得到:

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{a1} \\ \dot{U}_{b1} \\ \dot{U}_{c1} \\ \dot{U}_{a2} \\ \dot{U}_{b2} \\ \dot{U}_{c2} \end{bmatrix} = L \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & Z_{46} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & Z_{56} \\ Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{b1} \\ \dot{I}_{c1} \\ \dot{I}_{a2} \\ \dot{I}_{b2} \\ \dot{I}_{c2} \end{bmatrix} \quad (18)$$

并联电缆负载容量利用率的分析需要考虑不同回路电缆之间的相互影响。将同一回电缆整体看待,其分块矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C}^T & \mathbf{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中  $\mathbf{U}_i = [\dot{U}_{ai} \ \dot{U}_{bi} \ \dot{U}_{ci}]^T$ ;  $\mathbf{I}_i = [\dot{I}_{ai} \ \dot{I}_{bi} \ \dot{I}_{ci}]^T$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} r_c + r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{D_c} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{d} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{2d} \\ r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{d} & r_c + r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{D_c} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{d} \\ r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{2d} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{d} & r_c + r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{D_c} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{4d+D} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{3d+D} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{2d+D} \\ r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{3d+D} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{2d+D} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{d+D} \\ r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{2d+D} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{d+D} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{D} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{C}^T = \begin{bmatrix} r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{4d+D} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{3d+D} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{2d+D} \\ r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{3d+D} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{2d+D} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{d+D} \\ r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{2d+D} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{d+D} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{D} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} r_c + r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{D_c} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{d} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{2d} \\ r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{d} & r_c + r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{D_c} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{d} \\ r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{2d} & r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{d} & r_c + r_e + j0.144 \ 51g \frac{D_e}{D_c} \end{bmatrix} \quad (25)$$

( $i$  取 1 和 2,表示电缆回数); $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{H}$  为单回电缆芯线自感矩阵; $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{C}^T$  为两回电缆芯线互感矩阵。

并联运行时,两回电缆芯线电压降相等,即  $\mathbf{U}_1 = \mathbf{U}_2$ 。将式(19)两回芯线电压降方程作差,可得

$$0 = (\mathbf{A} - \mathbf{C}^T) \mathbf{I}_1 + (\mathbf{C} - \mathbf{H}) \mathbf{I}_2 \quad (20)$$

由负载容量利用率计算式(17)可知,当两回并联电缆电流完全相等,即假设  $\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2 = \mathbf{I}$  时,负载容量利用率达到最大值 100%。此时式(20)可化简为

$$0 = (\mathbf{A} - \mathbf{C}^T + \mathbf{C} - \mathbf{H}) \mathbf{I} \quad (21)$$

正常运行下  $\mathbf{I} \neq 0$ ,因此,当且仅当  $\mathbf{A} - \mathbf{C}^T + \mathbf{C} - \mathbf{H} = 0$  时,式(21)成立。换言之,若定义  $\mathbf{M} = \mathbf{A} - \mathbf{C}^T + \mathbf{C} - \mathbf{H}$  为均流矩阵,则均流矩阵  $\mathbf{M}$  为零矩阵,是并联电缆分流均衡,即负载容量利用率达到 100%的充要条件。

以水平独立布置 ABCcba 相序排列方式为例,研究其负载容量利用率。该排列方式下,电缆芯线自互感矩阵为

将式(22)~(25)代入均流矩阵表达式,可得

$$\mathbf{M} = j0.1445 \cdot \begin{bmatrix} \lg \frac{D_c(4d+D)}{D_c(4d+D)} & \lg \frac{d(3d+D)}{d(3d+D)} & \lg \frac{2d(2d+D)}{2d(2d+D)} \\ \lg \frac{d(3d+D)}{d(3d+D)} & \lg \frac{D_c(2d+D)}{D_c(2d+D)} & \lg \frac{d(d+D)}{d(d+D)} \\ \lg \frac{2d(2d+D)}{2d(2d+D)} & \lg \frac{d(d+D)}{d(d+D)} & \lg \frac{D_c D}{D_c D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

从式(26)可以看出,该排列方式下并联电缆均流矩阵不受电缆回间距和相间距的影响,恒为零矩阵,负载容量利用率始终等于 100%。对于水平独立布置下的其他相序排列方式,可以证明,均流矩阵均不等于零矩阵,其负载容量利用率降低。

对其余布置形式作类似分析,得到负载容量利用率恒为 100%的相序排列,如表 1 所示。

表 1 一点接地负载容量利用率恒为 100%的相序排列

Table 1 Phase sequence arrangements of 100% load

capacity utilization under one point grounding	
布置形式	相序排列
水平独立布置	ABCcba
水平两层布置	ABCabc/ABCcba
垂直两层布置	ABCabc/ABCcba
品字水平布置	ABCacb
品字垂直布置	—
倒三角垂直布置	ABCcab/ABCcba

由表 1 可知,除去品字垂直布置,其余布置形式均存在负荷电流均匀分配的相序排列方式。在上述排列方式下,并联电缆的负载容量利用率不受电缆间距的影响,始终等于 100%。

为进一步分析品字垂直布置并联电缆负载容量利用率的特点,利用提出的计算方法,作出负载容量利用率随并联电缆回间距  $D$  或相间距  $d$  的变化曲线,如图 4 所示。其中,电缆型号为 YJLW 03-Z-127/220 kV-1×2 500 mm<sup>2</sup>,铜导体半径为 30.75 mm, XLPE 绝缘半径为 69.2 mm,铝护套半径为 72 mm,外护层半径为 77 mm。 $D$  变化时,固定  $d=155$  mm;  $d$  变化时,固定  $D=500$  mm。

从图 4 可以看出,与前述分析结论相一致,品字垂直布置并联电缆任意相序排列均无法保证两回电缆负荷分流相等,相较而言,ABCbca 和 ABCcab 2 种相序排列方式下并联电缆的负载容量利用率最高。此外,从图中还可以看出,品字垂直布置形式下

并联电缆负载容量利用率随电缆回间距的增大或相间距的减小而提高。

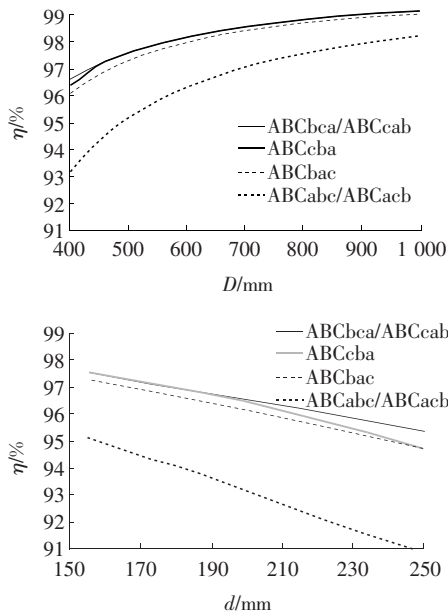


图 4 品字垂直布置一点接地负载容量利用率

Figure 4 Load capacity utilization of vertical triangles layout under one point grounding

## 2.2 金属护套交叉互联接地并联电缆负载容量利用率分析

金属护套交叉互联接地,双回并联电缆电压降方程的分块矩阵形式可由式(5)取回路数为 2,得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \mathbf{U}_{w1} \\ \mathbf{U}_2 \\ \mathbf{U}_{w2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{C} & \mathbf{D} \\ \mathbf{B}^T & \mathbf{E} & \mathbf{F} & \mathbf{G} \\ \mathbf{C}^T & \mathbf{F}^T & \mathbf{H} & \mathbf{I} \\ \mathbf{D}^T & \mathbf{G}^T & \mathbf{I}^T & \mathbf{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_{w1} \\ \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_{w2} \end{bmatrix} \quad (27)$$

式中  $\mathbf{U}_i = [\dot{U}_{ai} \ \dot{U}_{bi} \ \dot{U}_{ci}]^T$ ;  $\mathbf{U}_{wi} = [\dot{U}_{awi} \ \dot{U}_{bwi} \ \dot{U}_{cwi}]^T$ ;  $\mathbf{I}_i = [\dot{I}_{ai} \ \dot{I}_{bi} \ \dot{I}_{ci}]^T$ ;  $\mathbf{I}_{wi} = [\dot{I}_{awi} \ \dot{I}_{bwi} \ \dot{I}_{cwi}]^T$  ( $i$  取 1 和 2,表示电缆回数);  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$  和  $\mathbf{J}$  为单回电缆芯线或护套自感矩阵,其余为芯线或护套之间的互感矩阵。

将式(27)护套电压降方程减去式(11)同名护套电压降方程,消去护套电压降,得

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ 0 \\ U_2 \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & C & D \\ B^T & E' & F & G \\ C^T & F^T & H & I \\ D^T & G^T & I^T & J' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_{w1} \\ I_2 \\ I_{w2} \end{bmatrix} \quad (28)$$

式中  $E'$  的元素  $E'_{ij} = E_{ij} - (R_{11} + R_{21})$ ;  $J'$  的元素  $J'_{ij} = J_{ij} - (R_{12} + R_{22})$ 。并且,各接地电阻往往相等,即  $R_{11} = R_{21} = R_{12} = R_{22}$ 。

将芯线电压降方程作差,并利用护套电压降方程消去护套环流,得

$$0 = M_1 I_1 + M_2 I_2 \quad (29)$$

类比护套一点接地的分析,定义  $M = M_1 + M_2$  为均流矩阵,其等于零矩阵时,并联电缆负荷电流均匀分配,负载容量利用率达到 100%。对不同布置形式并联电缆的阻抗矩阵解析表达式进行分析,得到金属护套交叉互联接地负载容量利用率恒为 100%的相序排列如表 2 所示。

表 2 交叉互联接地负载容量利用率恒为 100%的相序排列

Table 2 Phase sequence arrangements with 100% load capacity utilization under cross connection grounding

布置形式	相序排列
水平独立布置	ABCcba
水平两层布置	ABCabc/ABCcba
垂直两层布置	ABCabc/ABCcba
品字水平布置	ABCacb
品字垂直布置	—
倒三角垂直布置	ABCcab/ABCcba

比较表 1 和表 2 可知,护套接地方式不影响各布置形式下负荷分流均衡的相序排列,同一布置形式下负载容量利用率恒为 100%的相序排列相同。

为分析品字垂直布置并联电缆负载容量利用率的特点,利用提出的计算方法,作出负载容量利用率随并联电缆回间距  $D$  或相间距  $d$  的变化曲线,具体如图 5 所示。其中,计算条件与护套一点接地相同。

由图 5 可知,对于品字垂直布置形式,交叉互联接地 ABCcab 相序排列的负载容量利用率最高,且随并联电缆回间距的增大或相间距的减小进一步提高。

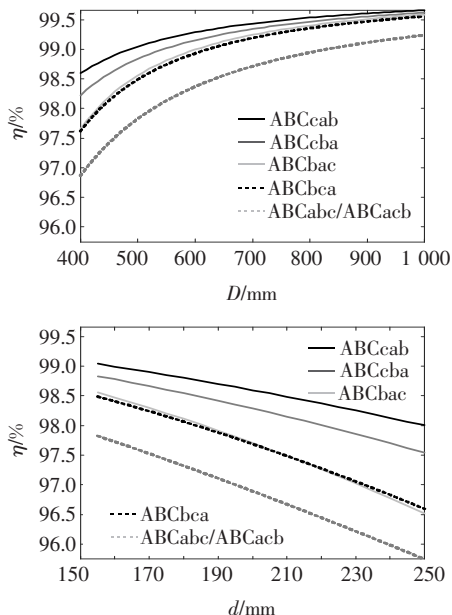


Figure 5 Load capacity utilization of vertical triangles layout under cross connection grounding

综合上述分析,为提高并联电缆的负载容量利用率,各布置形式应采用表 3 所示的相序排列。

表 3 不同布置形式建议相序排列

Table 3 Recommended phase sequence arrangements for different layouts

布置形式	相序排列
水平独立布置	ABCcba
水平两层布置	ABCabc/ABCcba
垂直两层布置	ABCabc/ABCcba
品字水平布置	ABCacb
品字垂直布置	ABCcab
倒三角垂直布置	ABCcab/ABCcba

表 3 中,除去品字垂直布置,其他布置形式的相序排列均能保证并联电缆负载容量利用率等于 100%且不受电缆间距的影响。对于品字垂直布置并联电缆,其负载容量利用率虽然无法做到 100%,但采用表 3 建议相序排列,仍能将其负载容量利用率维持在较高水平。以典型间距值 ( $D = 500 \text{ mm}, d = 155 \text{ mm}$ ) 为例,一点接地负载容量利用率大于 97%,交叉互联接地负载容量利用率达 99%,回间距增大时,可进一步提高负载容量利用率,能够更好地发挥并联电缆的输电能力。

需要指出的是,上述负荷利用率计算主要考虑的是并联电缆阻抗分流所造成的影响。在工程实际

中,并联电缆实际允许的负载容量除受阻抗分流特性影响外,还与电缆之间的温度场耦合影响有关<sup>[20-21]</sup>。在计算实际允许的载流量时,需根据所确定的排列方式,考虑温度场的耦合影响,进行综合计算。

### 3 仿真验证

在 PSCAD 仿真软件中,使用 Cable 元件搭建了并联电缆仿真模型。通过改变电缆的空间位置参数,实现并联电缆布置形式的改变。其中,电缆型号为:YJLW 03-Z- 127/220 kV- 1×2 500 mm<sup>2</sup>,结构参数见 2.1 节。对于交叉互联接地并联电缆,使用 3 个 Cable 元件模拟一条并联电缆线路,各 Cable 元件金属护套交叉连接,以真实反映交叉互联接地并联电缆的特点。利用所构建的并联电缆仿真模型,对文中所提出的并联电缆负载容量利用率计算方法和相关分析结论进行了仿真验证。

#### 3.1 负载容量利用率计算方法验证

为验证负载容量利用率计算方法的正确性,分别针对不同布置形式和相序排列方式,并考虑回间距和相间距的影响,对并联电缆的负载容量利用率进行了仿真测试,并与理论计算值进行了对比。图 6 给出了交叉互联接地下,水平独立 ABCabc 并联电缆负载容量利用率仿真实测值和理论计算值随电缆回间距的变化曲线。

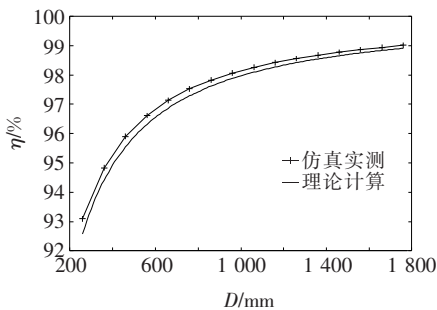


图 6 负载容量利用率计算值与仿真值对比

Figure 6 Comparison diagram of load capacity utilization calculation value and simulation value

从图 6 中可以看出,并联电缆负载容量利用率计算值与仿真值吻合度很高,满足工程应用要求。

#### 3.2 并联电缆负载容量利用率分析结果验证

受篇幅所限,以水平独立和品字垂直 2 种布置

形式为例,给出交叉互联接地方式下并联电缆负载容量利用率随回间距或相间距的仿真曲线,具体如图 7、8 所示。

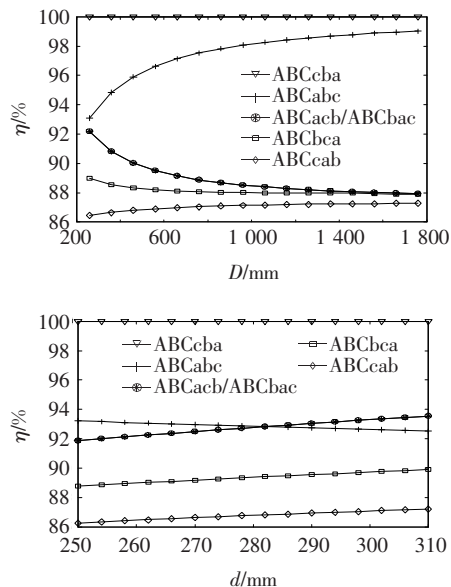


图 7 水平独立布置交叉互联接地负载容量利用率

Figure 7 Load capacity utilization of horizontal independent layout under cross connection grounding

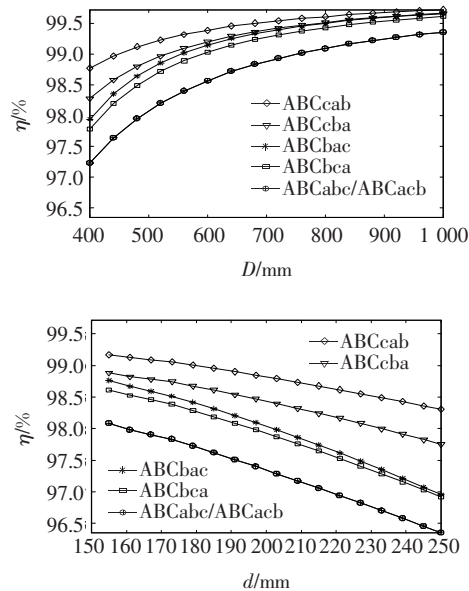


图 8 品字垂直布置交叉互联接地负载容量利用率

Figure 8 Load capacity utilization of vertical triangles layout under cross connection grounding

从图 7 可以看出,水平独立布置下,仅 ABCcba 相序排列能够保证负载容量利用率等于 100%,且不受电缆间距变化的影响。由图 8 可知,品字垂直布置并联电缆不存在分流均衡的相序排列方式,相较而言,ABCcab 相序排列方式下的负载容量利用



率最优,且增大回间距和降低相间距有助于提高并联电缆负载容量利用率。以上仿真结果与理论分析结论相一致。

## 4 结语

该文重点针对并联电缆负载容量利用率计算方法,以及不同布置形式下并联电缆负载容量利用率特点进行了分析,得到以下基本结论。

1)基于电缆芯线与金属护套构成的多回路电磁耦合基本方程,提出了一种多回路并联电缆的负载容量利用率计算方法。该方法不受电缆回数和布置形式的限制,数字仿真结果验证了所提出方法的正确性。

2)并联电缆负载容量利用率主要受电缆布置方式和相序排列方式的影响,护套接地方式以及回间距和相间距的影响相对较小。

3)对于常用的双回路电缆并联运行情况,除品字垂直布置形式外,其他布置形式均可通过文中给出的相序排列,使两回电缆负荷分流相等,负载容量利用率达到最优。对于品字垂直布置形式,采用ABCcab相序排列,可确保负载容量利用率最高。上述分析结论可为并联电缆布置形式的优化设计提供重要参考。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 马建伟,尹轶珂,王磊,等.基于三维温度场的电缆登杆对电缆群载流量的影响研究[J].电力科学与技术学报,2019,34(1):88-95.  
MA Jianwei, YIN Yike, WANG Lei, et al. 3D temperature field simulation of underground cables' ampacity influenced by the climbing-pole cable[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 88-95.
- [3] Freschi F, Tartaglia M. Power lines made of many parallel single-core cables: a case study[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(4): 1744-1750.
- [4] 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.
- [5] 廖星,冯玉雷,李健,等.距离保护应用于共相并联电缆的适用性分析[J].电力系统保护与控制,2021,49(1):98-105.  
LIAO Xing, FENG Yulei, LI Jian, et al. Applicability analysis of distance protection used in common-phase parallel cables[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 98-105.
- [6] 王波,罗进圣,黄宏新,等.220 kV高压单芯电力电缆金属护套环流分析[J].高压电器,2009,45(5):141-145.  
WANG Bo, LUO Jinsheng, HUANG Hongxin, et al. Analysis of circulating current in sheaths of 220 kV XLPE single-core cables[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 141-145.
- [7] 罗日成,李志前,李稳,等.同塔四回混压输电线路感应电压与电流分析[J].电力科学与技术学报,2015,30(1):52-59.  
LUO Richeng, LI Zhiqian, LI Wen, et al. Induced voltage and current analysis for four-circuit transmission line with different voltage classes on the same tower[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(1): 52-59.
- [8] Du Y, Yuan Y Z, Wang X H. Current distribution in parallel single-core cables on metal tray [J]. IEEE Transactions on Industry Applications. 2008, 44 (6): 1886-1891.
- [9] 陈飞,李征,孙义,等.并联电缆参量差异对其载流分配的影响[J].高压电器,2019,55(2):227-233.  
CHEN Fei, LI Zheng, SUN Yi, et al. Influence of parameter difference between parallel cables on current-carrying distribution[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 227-233.
- [10] 柴进爱,梁永春,李彦明.三相电缆并联导体间电流分布的研究[J].电力设备,2007,8(9):16-18.  
CHAI Jinai, LIANG Yongchun, LI Yanming. Study on current distribution of conductor in parallel three-phase

- cable[J]. *Electrical Equipment*, 2007, 8(9):16-18.
- [11] 刘渝根, 尚龙龙, 田金虎, 等. 220 kV 四回高压电缆同相 2 根并联敷设方式优化研究[J]. *高压电器*, 2015, 51(12):25-32+37.
- LIU Yugen, SHANG Longlong, TIAN Jinhu, et al. Optimal layout of the 220 kV quadri-circuit cables with double-split conductors in each phase[J]. *High Voltage Apparatus*, 2015, 51(12):25-32+37.
- [12] 张军强, 董卓元, 盛飞, 等. 长距离 330 kV 电缆护套交叉互联接地方式研究及回流缆优化布置方法[J]. *高压电器*, 2020, 56(2):189-196.
- ZHANG Junqiang, DONG Zhuoyuan, SHENG Fei, et al. Research on cross-connection grounding modes of long-distance 330 kV cable sheath and layout optimization of return cable[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(2):189-196.
- [13] 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 line parameters[J]. *Wire & Cable*, 2009(2):43-46.
- [14] 黄祖光, 朱安平, 王凯, 等. 基于 Dijkstra 算法的电缆敷设系统设计及实现[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(6):105-110.
- HUANG Zuguang, ZHU Anping, WANG Kai, et al. Design and implementation of cable laying system based on Dijkstra algorithm[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(6):105-110.
- [15] 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 of sequence impedances for parallel multi-circuit cable lines[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(8):186-191.
- [16] 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, 2002:181-183.
- [17] 林桂辉, 朱鹏宇, 王灿, 等. 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[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(20):142-148.
- LIN Guihui, ZHU Pengyu, WANG Can, et al. Analysis of electrical parameters and unbalance factors of 220 kV multi-circuit transmission cable based on Carson theory and EMTP simulation[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(20):142-148.
- [18] 官澜, 李奥森, 韩念遐, 等. 基于数字化三维模型的架空输电线路设计[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(3):105-109.
- GUAN Lan, LI Aosen, HAN Nianxia, et al. Design of overhead transmission lines based on digital three-dimensional model[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(3):105-109.
- [19] 樊友兵, 赵健康, 钱康, 等. 单芯电力电缆同相多根并联运行方式分析与优化[J]. *高电压技术*, 2010, 36(10):2607-2612.
- FAN Youbing, ZHAO Jiankang, QIAN Kang, et al. Analysis and optimization for operation of the single-core power cables in parallel[J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(10):2607-2612.
- [20] 马悦, 张勇, 张思祥. 排管内部强制水冷对地下电缆载流温度场的影响[J]. *智慧电力*, 2020, 48(10):120-125.
- MA Yue, ZHANG Yong, ZHANG Sixiang. Influence of forced water cooling in duct on temperature field of underground power cables[J]. *Smart Power*, 2020, 48(10):120-125.
- [21] 王馥珏, 周平, 韩宇泽. 基于耦合场计算的击穿电弧对电缆温度及应力影响研究[J]. *供用电*, 2019, 36(7):83-90.
- WANG Fuyue, ZHOU Ping, HAN Yuze. Study on influence of insulation breakdown arc on thermal-stress characteristics of joints based on coupled field calculation[J]. *Distribution & Utilization*, 2019, 36(7):83-90.