

三相多芯并联均流电缆设计开发

王振金

湖南华菱线缆股份有限公司 湖南 湘潭 411104

【摘要】：本文介绍了三相多芯并联均流电缆设计开发。该电缆采用多项多芯并联结构具备大电流输送，单位截面载流量高、温升低、热耗小等特点；同时采用多项多根空间完全等效排列使其有效防止同相多根间电流偏载，防止局部过载引起热老化、起火、短路。因此，该电缆特别适用于安全要求高、空间有限、投资费用受限的高功率、大电流电力输送。例如：电厂或大型工厂的变压器与主开关柜间、开关柜与大功率设备间等大电流电力输送。同时能有效解决传统并联电缆在大电流输送中偏载引起的单根过载、短路、起火事故。

【关键词】：并联；均流；空间对称；载流量；温升；偏载；直流电缆；交流电阻；集肤效应

Design and Development of Three-Phase Multi-Core Parallel Average Flow Cable

Zhenjin Wang

Hunan Hualin Cable Co., Ltd. Hunan Xiangtan 411104

Abstract: This paper introduces the design and development of three-phase multi-core parallel flow cable. The cable adopts multi-core parallel structure with large current conveying, high flow rate of unit section, low temperature rises and low heat consumption, etc. At the same time, multiple multi-root spaces are used to effectively prevent the current bias between the same phase multiple roots and prevent the local overload from causing thermal aging, fire and short circuit. Therefore, this cable is especially suitable for high power and large current power transmission with high safety requirements, limited space and limited investment cost. For example, transformers in power plants or large factories and main switchgear, switch cabinets and large power equipment and other large current power transmission. At the same time, it can effectively solve the single overload, short circuit and fire accident caused by the deviation of traditional parallel cable in large current transmission.

Keywords: Parallel; Average flow; Space symmetry; Load flow; Temperature rise; Partial load; Direct current cable; Alternating current resistance; Skin effect

引言

随着社会的发展，电气化水平提高，用电功率大大增加。目前，一般采用中高压输电及高压电机或采用铜铝排、母线或采用三相多根电缆并联。前两者在某些场所均存在安全问题、费用问题、空间问题而无法应用，例如电厂或大型工厂的变压器与主开关柜间、开关柜与大功率设备间等大电流电力输送。因此，后者同相多根大截面单芯电缆并联广泛应用于变压器与开关柜之间等大电流电力输送，用来提高整体电缆回路的输送能力，减少建筑规模，优化设备布置，提高输电灵活性。

但是该方法也存在以下问题：首先，同相中多根电缆因受到电缆间的邻近效应不一样导致电缆交流电阻不一；其次，每根电缆的电感受到其他电缆电感影响导致同相中每根电缆的电抗不一。而交流并联电路中电流的分配与阻抗成反比，又因阻抗=交流电阻+j*电抗。因此，这种方式常常导致电缆间电流不能平均分配，大大降低了解整体电缆回路的输电能力，同时易产生单根电缆过载引起短路。为此，相关科研机构进行相应研究，并做了改善性建议，例如：师宁等发表的《同相大截面并联电缆敷设对其电流分布的研究》^[1]；柴进爱等发表的《三相电缆并联导体间电流分布的研究》^[2]。然而，只解决了三相

2根并联的偏问题，三相3根及以上的未能解决，仅提出改善。另外，以上方案均存在三相的相间平衡，同时存在敷设空间等问题。因此，目前为止还没有安全、高效、经济方法解决电厂或大型工厂的变压器与主开关柜间、开关柜与大功率设备间的大电流输送问题。

1 三相多根并联均流原理

交流并联电路中电流的分配与阻抗成反比，阻抗 $Z=R_{交}+jX$ 。为达到每芯均流目的，必须保证每芯交流电阻与电抗相等^[3]。

首先，交流电阻为线芯直流电阻加集肤效应加邻近效应，即 $R_{交}=R_{直}(1+Y_s+Y_p)$ 。直流电阻为导体固有特性与电缆导体的材料、截面、长度相关，通过制作工艺的把控是很易达到一致。集肤效应是在交流情况下，电流集中在导表面流动；这也是为什么采用单相多芯并联提高整体载流量的依据之一，然此处主要说明的是如何保证几芯集肤效应相等： $Y_s=X_s^4/(192+0.8X_s^4)$ ； $X_s^2=8\pi f^*10^{-7}ks/R_{直}$ ，因此，集肤效应受频率 f 、直流电阻 R 直接影响，保证一致也相对容易。邻近效应是相邻电缆间电流相互引的作用：

$$Y_p=[X_p^4/(192+0.8X_p^4)](dc/s)^2[0.312(dc/s)^2+1.18/X_p^4+0.27];$$

$X_p = 8\pi f^2 \times 10^{-7} k_s / R_{直}$ 。因此，邻近效应与其他芯的相对距离有关。所以要保证单相中每一芯空间位置等效才能保证效应相等。

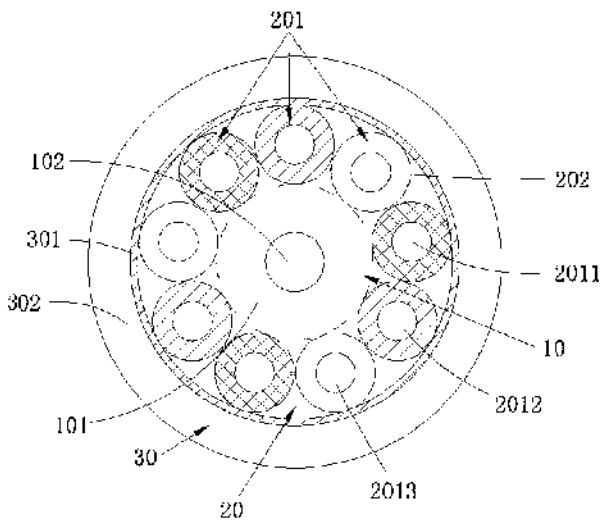
其次，电抗 $X = 2\pi fL$ ， L 为总电感为内 L_i 外 L_e 感之和。 $L_i = \mu_0 / 8\pi$ ； $L_e = 2\ln(2S/D_c) \times 10^{-7} - 2a \ln(2 \times 10^{-7})$ ，其中 $a = (-1 + j3^{0.5}) / 2$ 。仍然与线芯的外径及相互距离有关。同理，要总电感相等必须保证单相中所有芯的空间位置等效。

再次，外环境电磁的影响，也需设法屏蔽。

最后，就是 A、B、C 三相平衡问题，如师宁等发表的《同相大截面并联电缆敷设对其电流分布的研究》所述，三相 2 根并联的单相均流问题是解决了，但其采用平行排布，所以 A、B、C 三相各自的总阻抗是不等的。正常非并联电路要求品字形排布也就使三相的空间位置等效。所以为全面解决问题，A、B、C 三相的总空间位置也需等效。

2 均流电缆的设计开发

为实现三相多芯并联电缆中各线均流目的，设计一种三相多芯并联均流电缆结构包括中心托层、设置在中心托层外的主体输电层和设置在主体输电层外的保护层。其结构如图：



注：中心托层 10；橡胶层 101；中性线导体 102；主体输电层 20；多芯动力线芯 201；动力线芯 A2011；动力线芯 B2012；动力线芯 C2013；绝缘层 202；保护层 30；铜带 301；高分子护套层 302。

具体制作方法参照上图，一种三相多芯并联均流电缆结构，包括：中心托层 10、设置在中心托层 10 外的主体输电层 20 和设置在主体输电层 20 外的保护层 30；所述主体输电层 20 包括环中心托层 10 依次排布的三组多芯动力线芯 201，每组所述多芯动力线芯 201 的占位空间完全相等；所述多芯动力线芯 201 包括顺序设置的动力线芯 A2011、动力线芯 B2012 和动力线芯 C2013，所述多芯动力线芯 201 为 $3 \times N$ 组，所述 N 为正整数。主体输电层 20 由多芯动力线芯 201 组成，该多芯动力

线芯 201 的数量为三的倍数，多芯动力线芯 201 通过完全对称的方式围绕在中心托层 10 排列绞制而成，对称方式是三相及每相的多芯在空间位置等效。

其中以中心托层 10 为构架；结合主体输电层 20 的等分对称排列，使每组多芯动力线芯 201 受内部阻抗一致；再加上保护层 30 的屏蔽保证每芯不受外界电磁场影响，从而达到均流。

所述中心托层 10 包括位于中心的中性线导体 102 以及其外挤包橡胶层 101，该橡胶层 101 为挤包的可形变生胶构成。

所述中心托层 10 的内切圆的直径为 $D = d * [1 / \sin(360/n) - 1]$ ，其中， d 为动力线芯的直径， n 为动力线芯总数量。中心托层 10 的截面直径为单项多芯的主体输电层 20 截面直径的 1/2。

所述动力线芯 A2011、动力线芯 B2012 和动力线芯 C2013 均为导体线芯外挤包绝缘层 202 形成，所述绝缘层 202 的厚度大于等于导体线芯半径。

所述绝缘层 202 的绝缘材料为橡皮或塑缆材料。

所述动力线芯 A2011、动力线芯 B2012 和动力线芯 C2013 的外表面分别为完全不同的颜色。

每组所述多芯动力线芯 201 的占位空间为三分之一的中心托层 10 外空间。

所述保护层 30 为在主体输电层 20 外挤包高分子护套层 302 形成。具体的保护层 30 可以是由绕包铜带 301 外挤包高分子护套层 302 构成，这样可以有效地防止外界电磁场的干扰，并提供机械保护。

每相、每一芯的空间位置等效，因此所受到的电磁场的一致；外加金属屏蔽层有效地防止外界电磁场的干扰；从而三相的总阻抗一致，同时每相中每一芯的阻抗相等，保证了负载时每芯均流，防止电流跑偏，增加整体的载流量；避免单根过截引起发热、老化、熔断、短路、火灾等事故产生。

3 小结

通过以上设计完全解决三相多芯并联电缆中各线均流问题，所设计电缆在运行时明显存在以下优点。

(1) 运行温升低、热耗少、载流高：电缆采用多芯并联结构，每相分为多根使其表面增加，能有效利用“集肤效应”，使电缆的整体的交流电阻减小，从而达到相同截面、同等载流情况下该电缆比传统电缆发热少、温升低。增加电缆的输电能力。其效果类似于分割导体，同时比分割导体比导体间距离更大，本发明电缆绝缘层的厚度大于等于导体线芯半径，使间距大于导体外径，更有效地减少“邻近效应”及增加散热效果，这两种影响均与电缆芯间的距离成 4 次方成比例。另外，减少电缆制造难度。

(2) 防并联线路跑偏（偏载）、发热、短路引起火灾：电缆中的多芯采用空间位置等效排列，使电缆的三相及每相的

多芯在空间位置等效。保证每芯受到的“集肤效应”“邻近效应”及容抗效果相等，从而保证每芯的阻抗相等，有效防止偏载、发热、短路引起火灾。能有效解决：目前传统电厂或大型工厂的变压器与主开关柜间、开关柜与高功率设备间采用多根单芯电缆并联，因出现偏载引起的火灾。如：师宁等发表的《同相大截面并联电缆敷设对其电流分布的研究》中所述电厂就因偏载而引起火灾，再如：福建宏旺多根并联偏载的电缆发炮事故，等等。

(3) 安全及防外部环境电磁干扰引起偏载：电缆采用铜

带或其他金属总屏方式以解决外界干扰。同时铜带兼做地线，厚度按其截面达到电缆短路电流的要求。

(4) 结构稳定：电缆设有中心托层，托层内切圆的直径设计为 $D=d*[1/\sin(360/n)-1]$ 。然后采用 CAD 制图的方式，取得托层的截面。用当量的可塑性硅胶或相当的橡皮材料挤包中性线导体，电缆绞合成型（多马鞍型）后采用加热硫化使可塑性橡皮变为热固性的稳定结构（可与护层一同硫化）。从而保证电缆的结构稳定性，最终保证主输电层各芯的空间位置等效。

参考文献：

- [1] 师宁.邢台职业技术学院学报[J].世界橡胶工业,2010,27(3).
- [2] 柴进爱.三相电缆并联导体间电流分布的研究[J].电力设备,2007,8(9).
- [3] 金玉.电力电缆设计原理[M].北京:机械工业出版社,1999:28-32.