

# High-Voltage Cable Sheath Induced Voltage and Circulation Current Analysis

Xiangdong Zhu<sup>1</sup>, Yunong Shen<sup>1</sup>, Ning Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu

<sup>2</sup>Nanjing Xiniao Electric Equipment Company Limited, Nanjing Jiangsu

Email: 495405532@qq.com, 61018@njnu.edu.cn

Received: Aug. 8<sup>th</sup>, 2019; accepted: Aug. 27<sup>th</sup>, 2019; published: Sep. 3<sup>rd</sup>, 2019

---

## Abstract

First of all, the calculation equivalent circuit of the cross-interconnect grounding is established; through mathematical analysis, the circulation current and induced voltage through the metal sheath of the three-phase high voltage cable are deduced. And assign parameters calculate the circulation current of the sheath under MATLAB. Further from a single loop to a double loop, an equivalent circuit for the calculation of double loop circulation is established. In the case of double loop, considering the factors that affect the mutual influence of the core current and the sheath circulation current, the calculation formulae of the induced voltage and the circulation current of the sheath are given. The size of the sheath circulation current in three different cases was calculated, and the influence of three different factors on the sheath circulation current was discussed.

## Keywords

Double Circuit, Induced Voltage, Sheath Circulation Current

---

# 影响高压电缆护层环流的因素分析

朱向东<sup>1</sup>, 沈聿农<sup>1</sup>, 刘 宁<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京

<sup>2</sup>南京新澳电气设备有限公司, 江苏 南京

Email: 495405532@qq.com, 61018@njnu.edu.cn

收稿日期: 2019年8月8日; 录用日期: 2019年8月27日; 发布日期: 2019年9月3日

---

## 摘 要

本文建立了单回路交叉互联接地方式的环流计算等值电路, 通过数学分析推导出三相高压电缆金属护层

上流过的环流和感应电压的大小。并指定了参数，在MATLAB中仿真计算出了护层环流。进一步由单回线路延伸到双回线路，建立了双回路环流计算的等值电路，考虑了两回路线芯电流和护层环流互相影响的因素，给出了双回路感应电压和护层环流的计算公式。在双回路情况下计算了三种不同情况下护层环流的大小，并探讨了三种不同因素对护层环流的影响。

## 关键词

双回路，感应电压，护层环流

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着城市建设的快速发展和电网负荷的增长，同时为了节约用地、提高电网供电可靠性，在城市配电网中，用电力电缆取代架空线路已成必然趋势[1]。电缆供电的传输性能比较稳定，较少受自然环境的干扰，从而使供电的可靠性得到了提高。然而现在采用直埋或管沟敷设的电缆面临着各种外界因素对电缆绝缘和金属护层的影响，如水的侵蚀、虫蚁的蛀咬和外力对绝缘层的破坏等[2]。一旦电缆遭到破坏，就有可能发生短路或开路故障，导致电网安全事故，影响电网运行的稳定性。需要时刻关注着电缆的运行情况，但电缆的工作环境特殊，不方便直接监测，只能通过检测电缆线路环流值的大小来判断是否出现故障[3]。因此本文着重介绍了单、双回路护层环流的计算并且分析了影响环流的种种因素。

## 2. 单回路电缆的分析

### 2.1. 单回路护层环流的计算

为了对交叉互联接地的高压电缆金属护套接地电流进行计算，利用电路基本原理，建立了电缆金属护层交叉互联接地系统的等效电路，如图1所示。其中 $R_1$ 、 $R_2$ 为接地电阻； $R_e$ 为大地回路等值电阻； $U_{AM}$ 、 $U_{BM}$ 、 $U_{CM}$ 为护层电流在护层上产生的感应电压； $U_{A0}$ 、 $U_{B0}$ 、 $U_{C0}$ 为电缆线芯电流和输电线路电流在护层上产生的感应电压； $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 为护层环流； $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 为电缆三分段之后各段的长度。

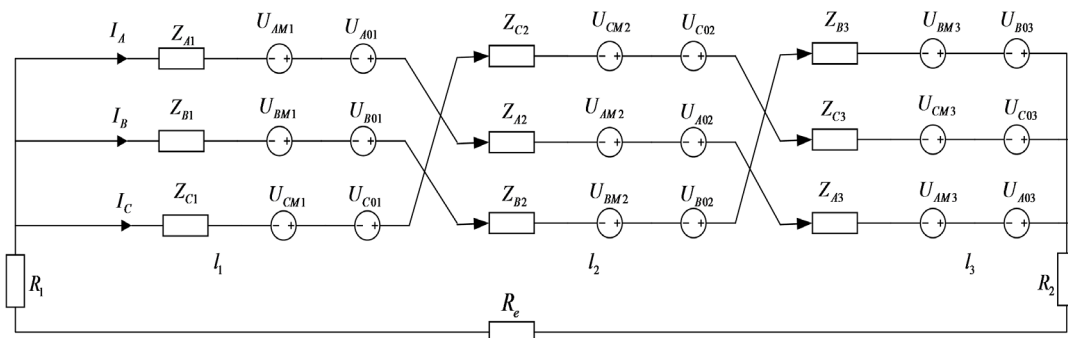


Figure 1. Circulation calculation equivalent circuit

图1. 环流计算等值电路

由电路定律得矩阵方程

$$\begin{bmatrix} Z & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 U_{A0i} \\ \sum_{i=1}^3 U_{B0i} \\ \sum_{i=1}^3 U_{C0i} \end{bmatrix} \quad (1)$$

矩阵方程中各参数的计算公式为

$$\begin{cases} Z = R_1 + R_2 + R_e + R_s + j \left( 2 \times 10^{-7} \omega l \ln \frac{D_e}{r_p} \right) \\ Z_{AB} = Z_{BA} = R_1 + R_2 + R_e + j \omega l \left( 2 \times 10^{-7} \ln \frac{L}{r_p} \right) \\ Z_{BC} = Z_{CB} = R_1 + R_2 + R_e + j \omega l \left( 2 \times 10^{-7} \ln \frac{mL}{r_p} \right) \\ Z_{AC} = Z_{CA} = R_1 + R_2 + R_e + j \omega l \left( 2 \times 10^{-7} \ln \frac{nL}{r_p} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $D_e$  为大地等值回路深度,  $R_s$  为电缆护层电阻,  $r_p$  为护层平均几何半径。(1)式中等式左边的矩阵已求的, 等式右边的电压矩阵将在 1.2 节给出, 这样环流矩阵就可以求出。

## 2.2. 单回路护层感应电压的计算

高压电缆常采用单芯结构, 线芯电流产生的交变磁场在金属护层上产生感应电动势[4]。对于一组单回路导线, 其三相线芯位置关系如图 2 所示。其中  $L$  为 A 护层与 B 护层之间的中心距离,  $nL$  为 A 护层与 C 护层之间的中心距离,  $mL$  为 B 护层与 C 护层之间的中心距离;  $r_p$  为护层平均几何半径。

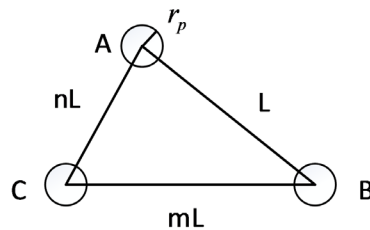


Figure 2. Arrangement of the center-to-center distance of each phase

图 2. 任意排列的各相中心距示意图

则 A 相护套由于线芯电流所增加的磁通总和为

$$\varphi_p = 2 \times 10^{-7} \left( I_B \ln \frac{L}{r_p} + I_C \ln \frac{nL}{r_p} \right) \quad (3)$$

设 A 相电流初始相位为  $0^\circ$ , 大小为  $I$ 。因为三相电流的对称性,  $I_B = \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) I$ , 同理

$$I_C = \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) I。$$

所以 A 相金属护层上, 由线芯电流产生的感应电压(V/m)为

$$E_A = -j\omega\phi_p = 2\omega I \times 10^{-7} \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \ln n + j \frac{1}{2} \ln \frac{nL^2}{r_p^2} \right] \quad (4)$$

同理可得 B 相和 C 相金属护层的由线芯引起的感应电压  $E_B$  和  $E_C$ 。

则(1)式右侧的电压矩阵为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^3 U_{A0i} = E_A I_1 + E_B I_2 + E_C I_3 \\ \sum_{i=1}^3 U_{B0i} = E_B I_1 + E_A I_2 + E_C I_3 \\ \sum_{i=1}^3 U_{C0i} = E_C I_1 + E_B I_2 + E_A I_3 \end{cases} \quad (5)$$

此时可以根据(1)式求出环流矩阵。

### 2.3. 分段长度对护层环流的影响

通过以上的数学分析，可以通过代入一些实际的参数，计算出在某些特定情况下三相电缆金属护层上的环流值的大小。并在 MATLAB 中对环流值进行仿真计算。

指定电压等级为 220 KV，电缆线路全长为 1830 m，电缆相间距  $L = 0.2$  米，护层平均几何半径  $r_p = 0.04$  米，接地电阻为  $0.5 \Omega$ ；护层电阻为  $0.4 \Omega$ ，大地等值回路深度  $D_e$  取 510 m。电缆三相呈 BAC 水平排列，大地回路等值深度取 510 m。如图 3 所示。暂取电缆线芯电流为 300 A。

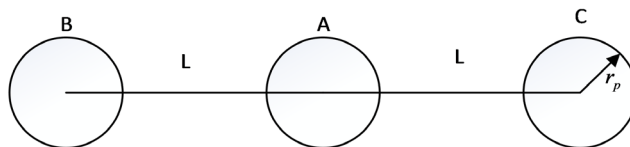


Figure 3. Cable three-phase arrangement diagram  
图 3. 电缆三相排列图

在分析三相交叉互联的情况时，假定第二段与第三段长度相等，线路总长仍为 1830 米时，改变第一段的长度，其余条件不变。在 MATLAB 中画出护层环流与第一段长度的关系图，如图 4 所示。

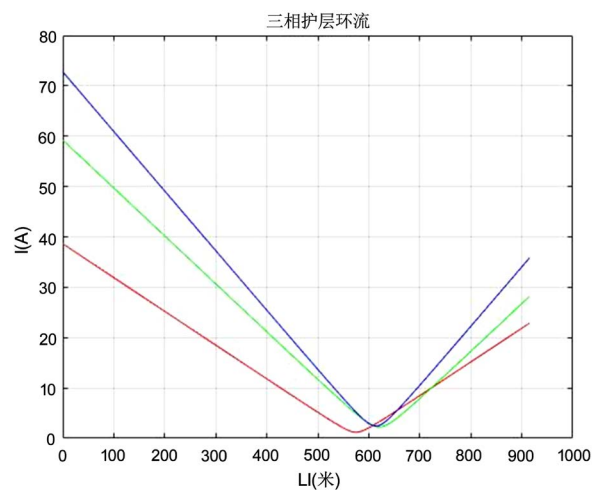


Figure 4. Three-phase sheath circulation diagram  
图 4. 三相护层环流图

图 4 表明了交叉互联分段长度越接近时环流越小。当且仅当三段长度相等时，环流达到最小值，且作为中间相的 A 相护层环流最小，B 相和 C 相比较大。由此可知电缆敷设时应保证三分段长度尽可能相等 [5] [6]，此状态下，正常工作时环流值最小，在线监测系统的警戒值可以设置的很低，护层环流稍有变化就能准确的检测出，提高了在线监测系统的灵敏性。

### 3. 双回路电缆的分析

#### 3.1. 双回路护层感应电压的计算

当一回电缆线路附近有其它平行回路的电缆时，则它的护层将会受到附近另一回路中电流的感应，因而不能再用单回路的公式来计算其护层感应电压了 [7]。假定任意排列的双回路电缆各相中心距离如图 5 所示。

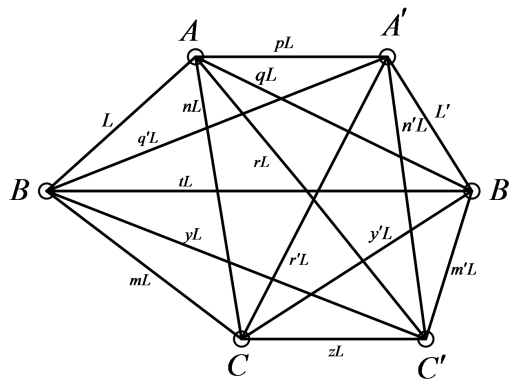


Figure 5. Arrangement of the center distance of each phase of the arbitrarily arranged double-loop cable  
图 5. 任意排列的双回路电缆各相中心距示意图

A 相护层由于附近回路所增加的磁通总和为

$$\varphi'_p = 2 \times 10^{-4} \left[ I'_A \ln \frac{pL}{r_p} + I'_B \ln \frac{qL}{r_p} + I'_C \ln \frac{rL}{r_p} \right] \quad (6)$$

假定附近回路的线芯电流也是平衡的，并且  $I_A$  和  $I'_A$  相等 [8]，则上式化简以后，得到附近回路在 A 相护层上产生的感应电压(V/m)为

$$E'_A = 2\omega I \times 10^{-4} \left[ -j \frac{1}{2} \ln \frac{p^2}{qr} - \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{q}{r} \right] \quad (7)$$

将(7)式和(4)式相加即可得此双回路的 A 相护层感应电压(V/m)为

$$E_{SA} = 2\omega I \times 10^{-4} \left[ j \frac{1}{2} \ln \frac{nqrL^2}{p^2 \times r_p^2} + \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{nr}{q} \right] \quad (8)$$

同理可得双回线路的 B 相和 C 相的护层感应电压  $E_{SB}$ 、 $E_{SC}$ 。

#### 3.2. 双回路护层环流的计算

建立双回路环流计算的等值电路，如图 6 所示。 $R$  为电缆金属护层的电阻； $X$  为电缆金属护层的自感抗； $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$ 、 $R_4$  为电缆两端的接地电阻； $R_e$  为大地漏电阻； $U_1 \sim U_3$  和  $U_4 \sim U_6$  分别为双回路六相电缆线芯上通过的电流(均为  $I_s$ ，单位 A)在三相电缆 A、B、C 和 A'、B'、C' 的金属护层上产生的感

应电动势； $U'_1 \sim U'_3$  和  $U'_4 \sim U'_6$  分别为双回路六相电缆护层上的环流( $I_{s1} \sim I_{s6}$ ，单位 A)在三相电缆 A、B、C 和 A'、B'、C' 的金属护层上产生的感应电动势；电缆交叉互联的三段长度分别为  $l_1, l_2, l_3$ 。

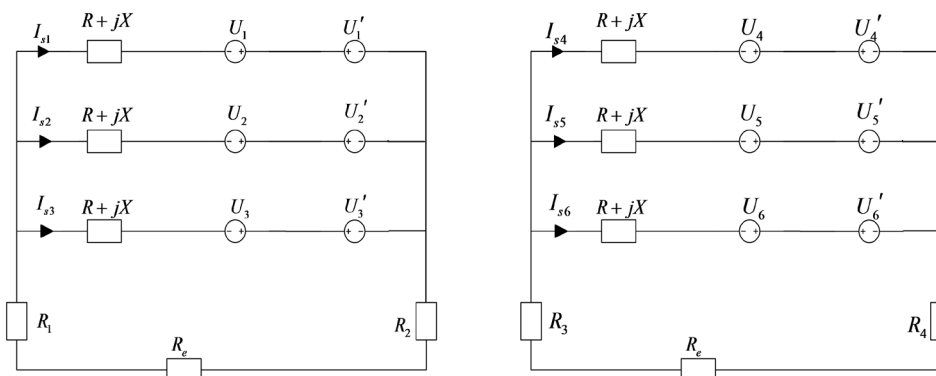


Figure 6. Dual loop circulation calculation equivalent circuit

图 6. 双回路环流计算等值电路

则

$$U_1 = E_{sA}l_1 + E_{sB}l_2 + E_{sC}l_3 \quad (9)$$

$$U'_1 = jI_{s2}(X_{11}l_1 + X_{12}l_2 + X_{13}l_3) + jI_{s3}(X_{21}l_1 + X_{22}l_2 + X_{23}l_3) + jI_{s4}(X_{31}l_1 + X_{32}l_2 + X_{33}l_3) + jI_{s5}(X_{41}l_1 + X_{42}l_2 + X_{43}l_3) + jI_{s6}(X_{51}l_1 + X_{52}l_2 + X_{53}l_3) \quad (10)$$

$X_1 \sim X_7$  为单位长度时不同相电缆金属护层之间的互感抗。 $U_2 \sim U_6$  和  $U'_2 \sim U'_6$  的计算公式与  $U_1$  和  $U'_1$  的计算公式类似。由此推导出双回路护层环流计算公式为

$$\begin{cases} (R + jX)I_{s1} + (R_1 + R_2 + R_e)(I_{s1} + I_{s2} + I_{s3}) + U'_1 = U_1 \\ \vdots \\ (R + jX)I_{s6} + (R_1 + R_2 + R_e)(I_{s4} + I_{s5} + I_{s6}) + U'_6 = U_6 \end{cases} \quad (11)$$

### 3.3. 影响环流的因素分析

两回路平行直线排列的交联电缆如图 7 所示。电压等级为 110 kV；同回路相间距为 180 mm；回路间距为 400 mm；电缆外径为 90 mm；长期载流量为 262 A；土壤电阻率为 0.0493 mΩ/m；大地等值回路深度  $D_e = 94\rho^{1/2}$  ( $\rho$  为土壤电阻率)，约为 20.868 m；线芯截面积为 300 mm<sup>2</sup>；接地电阻为 0.5 Ω；三分段交叉互联长度相等，均为 650 m。通过改变接地电阻，改变相间距及回路间距，改变交叉互联三分段的长度，分别计算出三种不同情况下护层环流的大小，并分析了产生差异的原因。

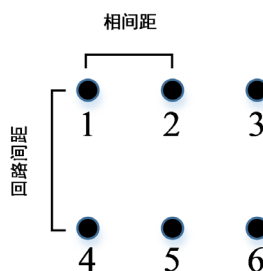


Figure 7. Double-loop parallel arrangement of cables

图 7. 双回路平行排列的电缆

## 1) 接地电阻不同

当接地电阻分别为  $0.5 \Omega$  和  $1 \Omega$  时, 在 MATLAB 中带入具体数据进行计算, 计算结果如表 1 所示。

**Table 1.** Sheath circulation current in each phase of a double loop cable in different grounding resistance  
**表 1.** 不同接地电阻时双回路电缆各相护层环流

接地电阻	护层环流					
	$I_{s1}$ (A)	$I_{s2}$ (A)	$I_{s3}$ (A)	$I_{s4}$ (A)	$I_{s5}$ (A)	$I_{s6}$ (A)
$0.5 \Omega$	2.373	2.373	2.373	5.111	5.111	5.111
$1 \Omega$	1.439	1.439	1.439	2.933	2.933	2.933

从表 1 可以看出, 适当增加接地电阻, 可以减小金属护层上的环流。但是不能一味的增加接地电阻, 因为当线路发生单相短路时, 过大的接地电阻会产生较大的短路电流, 会对线路产生严重的不利影响。

## 2) 相间距及回路间距不同

当相间距及回路间距分别为初始值的一半时, 即相间距为  $90 \text{ mm}$ , 回路间距为  $200 \text{ mm}$  时。在 MATLAB 中带入具体的数据进行计算, 计算结果如表 2 所示。

**Table 2.** Sheath circulation current in each phase of a double loop cable in different spacing  
**表 2.** 不同间距时双回路电缆各相护层环流

回路间距	护层环流					
	$I_{s1}$ (A)	$I_{s2}$ (A)	$I_{s3}$ (A)	$I_{s4}$ (A)	$I_{s5}$ (A)	$I_{s6}$ (A)
$180 \text{ mm}, 400 \text{ mm}$	2.373	2.373	2.373	5.111	5.111	5.111
$90 \text{ mm}, 200 \text{ mm}$	2.347	2.347	2.347	5.080	5.080	5.080

从表 2 可以看出, 减小一半的相间距和回路间距, 只能稍微的减小护层环流的大小。由于减小的幅度过小, 所以在敷设空间足够的情况下, 不建议将电缆各相各回路紧密排列。因为电缆上有很大的电流, 工作时会产生很大的热量, 电缆紧密排列会造成散热困难, 使电缆过度发热, 存在安全隐患[9]。

## 3) 三分段长度不同

当改变三分段交叉互联的各段长度时, 此时三段长度不相等, 分别为  $650 \text{ m}$ 、 $638 \text{ m}$ 、 $567 \text{ m}$  时。在 MATLAB 中带入具体的数据进行计算, 计算结果如表 3 所示。

**Table 3.** Sheath circulation current in each phase of a double loop cable in different length  
**表 3.** 不同长度时双回路电缆各相护层环流

分段长度	护层环流					
	$I_{s1}$ (A)	$I_{s2}$ (A)	$I_{s3}$ (A)	$I_{s4}$ (A)	$I_{s5}$ (A)	$I_{s6}$ (A)
$650 \text{ m}, 650 \text{ m}, 650 \text{ m}$	2.373	2.373	2.373	5.111	5.111	5.111
$650 \text{ m}, 638 \text{ m}, 567 \text{ m}$	9.046	3.841	2.514	7.536	8.940	5.808

从表 3 可以看出, 当非均匀分段时, 护层环流明显大于均匀分段的环流值。这是因为交叉互联均匀分段时, 由于交叉互联的对称性, 感应电压之间叠加可以相互抵消。导致护层上感应电压较非均匀分段时要小, 进而产生较小的护层电流, 这和单回路时的情况类似。因此电缆敷设时, 因尽可能满足交叉互联分段的长度相等[10]。

## 4. 结语

针对高压电缆在地下管廊中运行时可能出现的实际问题, 本文建立了单回路环流计算的等值电路, 通过理论分析和软件仿真, 计算了环流的大小, 并分析了结果。展望未来, 管廊中同时敷设多回路高压电缆是必然趋势, 因此结合了双回路的模型进行了分析, 为以后多回路电缆的环流分析提供了一个思路。通过理论分析和仿真计算得出: 对于多回路电缆交叉互联时, 在保证线路安全运行的基础上应选择尽可能大的接地电阻可以明显地降低电缆护层的环流大小; 同时相与相, 回路与回路的间距应尽可能的增大, 可以有效地散热, 保证电缆运行的安全性; 最关键的是三分段的长度应均等, 只有均等的分段才会保证每段电缆上的环流值相等, 不会出现环流过大或过小进而影响电缆的绝缘。通过本文可以看出环流分析的意义, 即最优化敷设线路和计算出环流正常的工作值, 为今后在线监测系统的开发提供了理论指导。

## 参考文献

- [1] 袁燕岭, 高中强, 陈昕, 等. 高压电缆线路接地系统在线监测[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(2): 77-82.
- [2] Liao, Y., Sun, T., Zhang, L., *et al.* (2016) Power Cable Condition Monitoring in a Cable Tunnel: Experience and Inspiration. *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Xi'an, 25-28 September 2016, 594-597.
- [3] 马庆峰. 交联聚乙烯绝缘电缆在线监测系统的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [4] 杜伯学, 李忠磊, 张锴等. 220kV 交联聚乙烯电力电缆接地电流的计算与应用[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1034-1039.
- [5] 王谦, 郝建, 张电, 等. 交叉互联高压电缆绝缘故障的理论及仿真分析[J]. 高压电器, 2014(9): 47-52.
- [6] 邹宏亮, 孙云莲, 张弛, 等. 多回路电力电缆不同敷设方式对环流的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(8): 2426-2433.
- [7] Gulski, E., Rakowska, A., Siodla, K., Jongen, R., Cichecki, P., Parciak, J. and Smit, J.J. (2014) On-Site Testing and Diagnosis of Transmission Power Cables up to 230 kV Using Damped AC Voltages. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 30, 27-38. <https://doi.org/10.1109/MEI.2014.6804739>
- [8] 张嘉乐, 吴耀辉. 多回输电线路下单芯电力电缆护套感应电压和环流计算分析[J]. 电气技术, 2016, 17(8): 50-54.
- [9] 郑建康, 苏小婷, 郑琳子. 多回路高压电缆金属护套环流计算研究与分析[J]. 电力电子技术, 2017, 51(5): 103-105.
- [10] Jaroslaw, P., Edward, G., Aleksandra, R. and Krzysztof, S. (2016) Diagnostic and Acceptance Tests of AC Long Lengths High Voltage Power Cables. *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Chengdu, 19-22 September 2016, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2016.7800926>

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;  
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-1565, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [tdet@hanspub.org](mailto:tdet@hanspub.org)