

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191279

## 配电网高温超导电缆的工频参数分析

兰莉<sup>1</sup>, 仇成<sup>1</sup>, 杜习周<sup>1</sup>, 郭明星<sup>1</sup>, 赵文彬<sup>2</sup>, 黄一超<sup>1</sup>, 谢伟<sup>1</sup>, 费斐<sup>1</sup>

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200122; 2. 上海电力大学, 上海 200090)

**摘要:** 阐述了高温超导电缆的发展现状, 重点介绍了 35 kV 及以下电压等级适用于配电网的高温超导电缆结构和基本性能。针对推荐使用的三相共容器和三相同轴型两种电缆结构进行了分析, 构建了高温超导电缆模型。对比计算了不同结构高温超导电缆的电气特性, 提出了相应的工频参数实用化计算方法, 计算了电缆的工频参数。针对配电网条件下应用高温超导电缆的场景, 仿真分析了实际应用过程中高温超导电缆的暂态电气特性。

**关键词:** 高温超导电缆; 工频参数; 配电网

### Analysis of power frequency parameters of HTS cables in a distribution network

LAN Li<sup>1</sup>, QIU Cheng<sup>1</sup>, DU Xizhou<sup>1</sup>, GUO Mingxing<sup>1</sup>, ZHAO Wenbin<sup>2</sup>, HUANG Yichao<sup>1</sup>, XIE Wei<sup>1</sup>, FEI Fei<sup>1</sup>

(1. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China;  
2. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** The state-of-the-art development of HTS cables is described. The structure and basic performance of HTS cables for a distribution network with voltage level of 35 kV and below are examined. Structures of the “3-in-one” and the tri-axial core type HTS cable are analyzed. Models of the two kinds of HTS cable are constructed. The electrical characteristics of different structures of the HTS cables are compared and calculated. A practical calculation method for power frequency parameters is proposed, and those parameters of the two kinds of HTS cable are calculated. Given the need to employ an HTS cable in distribution network, a simulation analysis is carried out, and the transient electrical characteristics of the HTS cable in practical application are presented.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. 520940180014) “Key Technologies and Demonstration Application Research for Domestic km-grade HTS Cable System”.

**Key words:** high temperature superconductivity cable; power frequency parameters; distribution network

## 0 引言

随着我国经济发展, 以上海为代表的一些超大型城市的核心地区会出现负荷发展超预期的情况, 但是中心区域往往用地紧张, 变电站扩容困难。为了解决核心区域的供电问题, 美国、德国、日本、韩国等国开始尝试使用超导电缆提高负荷集中区域的供电能力<sup>[1-2]</sup>。

超导材料是超导电缆的主要导体, 超导材料冷却至液氮温度时, 会表现出零电阻特性, 因而超导

体的载流能力可以轻易超过常规的铜、铝等金属材料, 从而能够满足高密度大容量的输电需求。随着高温超导(High-Temperature Superconducting, HTS)材料的发现, 超导体的临界温度已经高于液氮温度, 液氮价格便宜、资源丰富、易于制备, 大大推进了 HTS 技术推广。利用 HTS 材料制成的高温超导电缆与常规电缆相比, 具有容量大、占地小、损耗低、电磁感应低等优势技术特性, 具有较好的经济和社会效益<sup>[3]</sup>。

国际上, 美国是最早尝试开展 HTS 电缆商业运行的国家, 2003 年美国能源部(Department of Energy, DOE)组织了 3 个团队开展了 HTS 电缆示范工程<sup>[4]</sup>。该示范工程分别对 138 kV、34.5 kV 和 13.6 kV 三种

**基金项目:** 国家电网公司总部科技项目资助(520940180014)  
“国产公里级高温超导电缆系统关键技术及示范应用研究”

电压等级的 HTS 电缆进行了工程示范, American Superconductor、SuperPower ULTERA、LS Cable 等厂商分别投产了各自的 HTS 电缆产品。经过 10 余年的发展, 目前超导电缆技术日益成熟, IEC 已经组织编制了相关的产品测试标准 IEC60375:2019<sup>[5]</sup>。

我国在超导电缆方面也有一定投入, 云南电力、宝钢等单位都曾经开展过工程示范<sup>[1-2]</sup>。近年来, 国家电网公司已经启动了公里级高温超导电缆的应用示范项目, 以推动国产超导电缆技术的发展, 尤其是推进超导电缆在城市配电网中的实际应用。本文将介绍项目中关于电缆应用场景方面子课题的部分研究成果。

### 1 配电网交流 HTS 超导电缆的典型结构

虽然超导电缆具有极佳的导电性, 但是还是有一定损耗, 所以必须与高压绝缘技术相结合。根据容量和电压不同, HTS 电缆的结构有一定差异, 配电 HTS 电缆结构更加紧凑。实际上, 超导电缆的结构一直处于发展过程中, 而且随着材料性能的提升而不断改变。

在超导电缆发展的早期, 其结构与常规电缆相似并采用室温绝缘(Warm Dielectric, WD)设计, 而近 10 年来国内外的超导电缆示范工程催生了一批 HTS 电缆产品, 并使电缆结构得到较大的改进, 也明确了冷绝缘(Cold Dielectric, CD)HTS 电缆的优点, 同时也形成了行业认同<sup>[6]</sup>, HTS 电缆的结构类型如图 1 所示。

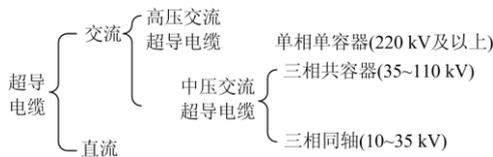


图 1 超导电缆的分类

Fig. 1 Classification of superconducting cables

针对配电网的应用需求, 三相共容器和三相同轴型的超导电缆较为合适<sup>[6]</sup>, 其典型结构如图 2 所示。

图 2 给出了冷绝缘式超导电缆的主体结构, 实际的超导电缆产品还包括绕包过渡层和支撑管等细致结构, 已经有较详细研究和报道<sup>[7-8]</sup>。图 2(a)所示的三相共容器型 HTS 电缆实际上是三个单相冷绝缘 HTS 电缆共用同一个制冷容器组成的, 但是不同厂家电缆结构也有差别, 例如 HTS 导体的层数、HTS 屏蔽的层数、中心骨架材质、液氮的通路等, 均可以灵活配置<sup>[9]</sup>; 图 2(b)给出了三相同轴型超导

电缆的典型结构, 该结构类型 HTS 电缆的共同特点是 A、B、C 三相同轴布置, 但不同产品采用超导材料和规格也有一定差异<sup>[10]</sup>。

图 2 所示 HTS 电缆结构都是国外产品, 我国目前尚无相关的结构标准, 也无规模化的生产能力。

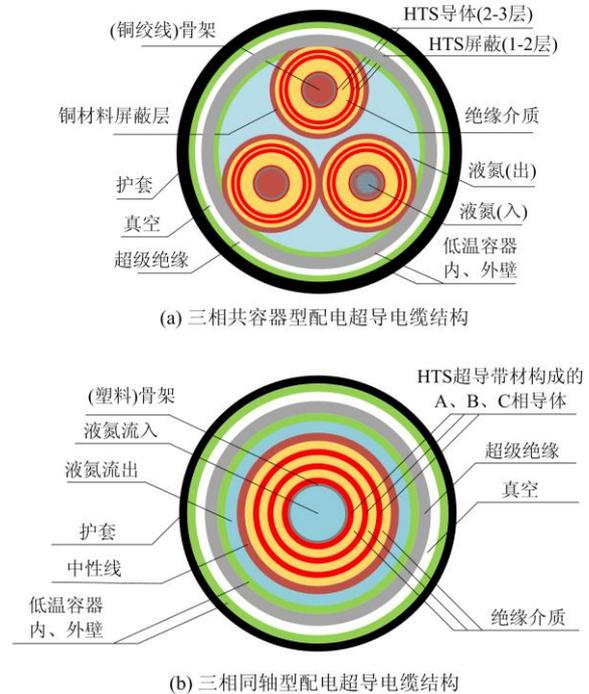


图 2 配电网超导电缆典型结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of typical structure of distribution superconducting cable

### 2 交流 HTS 电缆的性能优势及其主要参数

HTS 电缆在阻抗、损耗、快速失超等方面的优越性能吸引了各先进国家竞相开展研究。美国和日本的制造厂曾联合开展 HTS 电缆示范工程<sup>[11]</sup>; 德国则建设了 HTS 电缆与 HTS 限流器在配网中联合应用的工程示范<sup>[12]</sup>; 韩国超导电缆的制造企业也开展了相关的实验工程<sup>[13]</sup>。根据我国配电网的特征, HTS 电缆在配电网中的应用可以归纳为 4 个大类, 如表 1 所示。

表 1 超导电缆在配网中的应用

Table 1 Application of superconducting cable in distribution network

序号	技术特点	应用场景
1	大容量	变电站增容、线路增容、承载负荷转移、通道改造
2	低损耗	负荷中心中压直接供电替代变电站、低压侧互联 提高可靠性
3	低阻抗	无功需求低、扩大供电范围
4	失超特性	替代大容量断路器

表 1 中给出了超导电缆在配电网中的典型应用场景, 并给出了对应的技术特点, 这些技术特点主要来自于超导电缆的材料和结构。有国外研究者对比了 120 kV 电压等级条件的超导电缆、常规电缆和架空线的电气参数<sup>[14]</sup>, 如表 2 所示。

表 2 单相单容器型高压超导电缆的电气参数

Table 2 Electrical parameters of single-phase single-container high-voltage superconducting cable

设备	电阻/ ( $\Omega/\text{km}$ )	电感/ ( $\text{mH}/\text{km}$ )	电容/ ( $\text{nF}/\text{km}$ )
冷绝缘超导电缆	0.000 1	0.06	200
XLPE 电缆	0.03	0.36	257
架空线	0.08	1.26	8.8

从表 2 可以看出高压超导电缆与传统电缆和架空线相比, 电阻和电感远远小于传统输电设备, 电容比 XLPE 电缆的值略小。

超导电缆在配电网进行工程应用的过程中, 仅仅考虑电气参数是远远不够的, 需要针对电网规划、工程设计、产品制造、工程实施、运行维护等全寿命周期的各个环节建立超导电缆的参数体系。超导电缆的很多参数, 包括交流损耗<sup>[15]</sup>、经济性<sup>[16]</sup>及热损失<sup>[17]</sup>、失超特性<sup>[18]</sup>等都是研究热点, 而电气参数中的层间电流分布<sup>[19]</sup>和短路模型<sup>[20]</sup>受到了研究者的普遍关注。

### 3 配电网交流 HTS 电缆的工频参数

#### 3.1 三相共容器型交流 HTS 电缆的工频参数

在实际的电缆工程中, 保护整定、潮流计算和短路电流等都需要用到工频参数, 交流 HTS 电缆作为一种新型电缆, 有必要开展相关论证和估算。

常规电缆的稳态和故障电流会在大地和电缆护套层间分流, 且分流的比例会受敷设条件、接地方式、排列方式等多种因素的影响, 因此电缆的工频参数计算是比较复杂的, 如果电缆采用交叉互联的敷设方法, 则工频参数计算将更加困难<sup>[21]</sup>, 所以通常需要以实测结果作为运行依据<sup>[22]</sup>。

对于配电网中的超导电缆, 几乎全部故障电流都能通过超导屏蔽层回流, 且距离不长, 因而能够对其工频参数进行估算。文献[23]较为全面地总结了 HTS 电缆的电气参数和损耗等估算方法的现状。本文对日本住友的三相共容器型 HTS 电缆产品进行了分析, 结构尺寸如表 3 所示。

表 3 中 HTS 电缆的规格参数来自于住友电工公开的资料<sup>[24]</sup>。该资料没有详细提供各层的尺寸, 仅给出了金属导体截面积、绝缘层和超导层的层数、

厚度、外径等部分数据, 因此本文依据这些数据间的几何关系建立方程进行了推算, 求解出各层的半径, 能够满足计算需求。

表 3 日本产三相共容器型超导电缆结构参数

Table 3 Structure parameters of three-phase co-container type superconducting cable produced in Japan

组成	规格	厚度	计算半径/mm
铜骨架	140 mm <sup>2</sup>	6.67 mm	6.67
高温超导层	4 层	0.26 mm/层	7.92
绝缘	PPLP: 7 mm	7 mm	14.92
超导屏蔽	2 层	0.26 mm/层	15.52
铜屏蔽	3 层: 80mm <sup>2</sup>	0.26 mm/层	16.32
三芯包裹层	—	1.2 mm	17.50
冷容器	双层不锈钢管	制冷容器内半径	36.24
护套	PVC	—	67.50

三相共容器型电缆的结构与常规电缆相似, 因而可以直接利用 PSCAD 软件提供的共管式三相电缆结构进行建模, 建模时需要考虑三相电缆“品”字形布置, 并将外护层引出, 以便于模拟 HTS 电缆的层间电流, 如图 3 所示。

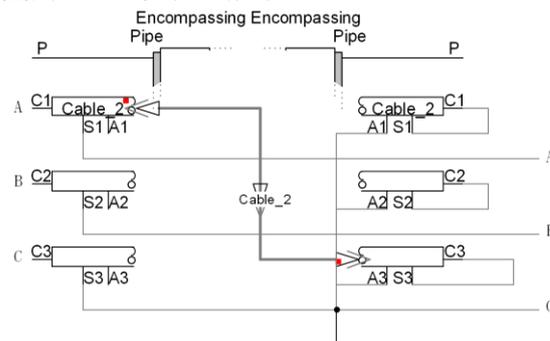


图 3 三相共容器型超导电缆计算模型

Fig. 3 Three-phase container type superconducting cable calculation model

图 3 中计算利用 PSCAD 软件提供的三相共管式电缆模型, 构建了图 2(a)所示的 HTS 电缆结构, 为了体现超导特性, 导体和屏蔽层的电阻率设为  $1.72 \times 10^{-20} \Omega$ , 并且强制电缆电流通过屏蔽层回流用来体现超导电缆低阻抗的性质。

传统方法需要建立部分电容网络、自感和互感网络计算电缆的工频参数, 本文则运用 PSCAD 仿真计算手段模拟《交流输电线路工频电气参数测量导则》(DL/T 1583)给定的工频参数试验过程求取 HTS 电缆的工频参数, 使计算工作得到简化。

首先, 需要获得正序短路阻抗  $Z_{S1}$ 、正序开路阻抗  $Z_{O1}$ 、零序短路阻抗  $Z_{S0}$  和零序开路阻抗  $Z_{O0}$  四

个基本测量数据,方法如下:

1) 单回电缆线路首端施加三相正序电源,末端分别设置为短路和开路状态,获得  $Z_{S1}$  和  $Z_{O1}$ ;

2) 单回电缆线路首端施加单相电源,末端分别设置短路和开路状态,分别获得  $Z_{S0}$  和  $Z_{O0}$ 。

然后,按照表 4 的流程和公式获得工频参数。

表 4 基于试验方法进行仿真计算的流程及公式

Table 4 Flow and formula of simulation calculation based on test method

参数名称	正序参数		负序参数	
	正序短路阻抗	正序开路阻抗	零序短路阻抗	零序开路阻抗
原始测量数据/ $\Omega$	$Z_{S1}$	$Z_{O1}$	$Z_{S0}$	$Z_{O0}$
特征阻抗/ $\Omega$	$z_{c1} = \sqrt{Z_{S1}Z_{O1}}$		$z_{c0} = \sqrt{Z_{S0}Z_{O0}}$	
传播系数 1/km	$\gamma_1 = \frac{\text{arch}\sqrt{Z_{O1}/Z_{S1}}}{D}$		$\gamma_0 = \frac{\text{arch}\sqrt{Z_{O0}/Z_{S0}}}{D}$	
单位长度阻/( $\Omega$ /km)	$z_1 = z_{c1}\gamma_1$		$z_0 = z_{c0}\gamma_0$	
单相电阻/( $\Omega$ /km)	$r = \text{Re}(z_1)$			
单相自电感/(mH/km)	$l = \frac{\text{Im}(z_0 + 2z_1)}{3(2\pi f)} \times 10^3$			
单相对地电容/(pF/km)	$c_0 = \frac{\text{Im}(z_0)}{3(2\pi f)} \times 10^{12}$			

在 PSCAD 中应用图 3 的模型搭建试验回路,就能够计算出给定频率  $f$  条件下 HTS 电缆的正序特征阻抗  $z_{c1}$  和零序特征阻抗  $z_{c0}$ ; 给定电缆长度  $D$  后就能够求出正序和零序传播系数  $\gamma_1$  和  $\gamma_0$ ; 进而求出单位长度的正序阻抗  $z_1$  和单位长度的零序阻抗  $z_0$ ; 单相电阻  $r$ 、单相电感  $l$  和单相对地电容  $c_0$  也可以同时求解。表 3 所示 HTS 电缆的工频参数计算结果如表 5 所示。

表 5 三相共容器型 HTS 电缆工频参数估算值

Table 5 Estimated power frequency parameters of three-phase common container type HTS cable

参数名称	零序	正序
特征阻抗/ $\Omega$	6.501 5	6.631 3
单位长度阻抗/( $\Omega$ /km)	0.039 9	0.039 8
单相电阻/( $\Omega$ /km)	0.000 0	
单相电抗/(mH/km)	0.126 8	
单相电容/( $\mu$ F/km)	2.881 2(接地)/0.55(浮地)	

如表 5 所示,计算得到 HTS 电缆单相电抗为 0.127 mH/km,这一数值与文献[11]附录 A-1 中给出的电缆自阻抗计算结果 0.15 mH/km 的数值接近,该结果与韩国 LS 电缆公司三相共容器型同类超导电缆的 0.1 mH/km<sup>[13]</sup>的标称值也比较相近。

冷绝缘结构的 HTS 超导电缆具有超导屏蔽层,回流层的电阻较小,因而具有自感较小的特点,这与本文计算结果是一致的,说明本文建立的模型能

够反映配电网 HTS 超导电缆的电阻和电抗水平。本文在计算中还发现,HTS 电缆的屏蔽层接地方式对电容有显著影响,这也与实际情况相符。

### 3.2 三相同轴型交流 HTS 电缆的工频参数

三相同轴型 HTS 电缆是一种特殊类型,与常规电缆结构差异很大,由于各相半径不同因而各相阻抗不对称,各相的损耗也不一致,因此 IEC63075 中要求针对这种类型的 HTS 电缆进行分相试验<sup>[5]</sup>。三相同轴型 HTS 电缆的电气结构可以等效为图 4 所示的形式。

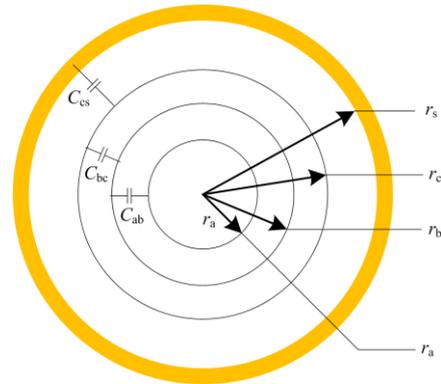


图 4 三相同轴型 HTS 电缆简化计算图

Fig. 4 Simplified calculation diagram of three-phase coaxial HTS cable

三相同轴型 HTS 电缆在成本方面具有明显优势,但是三相不对称引起的阻抗不平衡问题也是明显的,因而一直受到 HTS 电缆研究领域的持续关注,研究报道较多<sup>[24-26]</sup>,韩国研究者在最近的研究进展中重点讨论了三相平衡设计的方法<sup>[27]</sup>。从这些文献报道能够看出,对于三相同轴型的 HTS 电缆,采用“ $\pi$ ”型等效电路进行仿真的效果是可以接受的。

文献[28]给出了一种三相同轴型 HTS 电缆的详细设计参数,如表 6 所示。

表 6 三相同轴型 HTS 电缆的典型设计参数

Table 6 Typical design parameters of three-phase coaxial HTS cable

层数	带材宽度/mm	绕制间隙/mm	带材数量	半径/mm	绕制节距/mm	计算绕制角度/( $^\circ$ )
1	4.2	0.2	23	17	276	20.11
2	4.2	0.2	29	21	-339	20.61
3	4.2	0.2	36	25	941	9.56
4	—	—	—	29	-213	—

表 6 中的带材的绕制角度是根据文献[29]和文献[30]给出的方法计算得出的,绕制方向由绕制节距的“ $\pm$ ”确定,其中顺时针为正方向<sup>[31]</sup>。

根据电缆的参数,本文计算得出电缆各层的自感、互感和层间电容,如表 7 所示。

利用表 7 中的参数就能够建立三相同轴型 HTS 电缆的电气模型, 如图 5 所示。

表 7 三相同轴型 HTS 电缆的工频参数

Table 7 Power frequency parameters of three-phase coaxial HTS cable

参数	内层		中层		外层		自感/ (mH/ km)
	自(互) 感/(mH/ km)	互电 容/( $\mu$ F/ km)	自(互) 感/(mH/ km)	互电 容/( $\mu$ F/ km)	自(互) 感/(mH/ km)	互电 容/( $\mu$ F/ km)	
内层	0.121 8	—	0.052 4	0.263	0.034 1	—	—
中层	0.052 4	0.263	0.079 7	—	0.024 2	0.319	—
外层	0.034 1	—	0.024 2	0.319	0.032 5	—	—
铜屏蔽	—	—	—	—	—	0.375	0.072 3

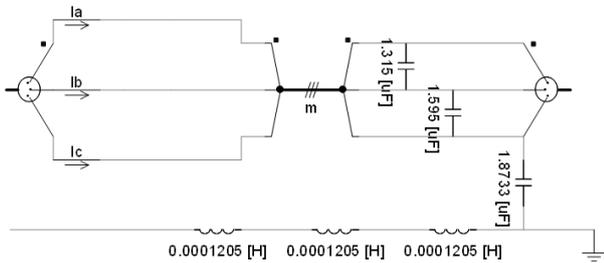


图 5 三相同轴型超导电缆计算模型

Fig. 5 Three-phase coaxial superconducting cable calculation model

#### 4 交流 HTS 电缆的计算模型及应用

应用本文提出的方法能够获得两种配电网交流 HTS 电缆的 PSCAD 模型, 求出的工频参数可以用于电网计算常用的软件, 也可以直接使用 PSCAD 模型进行仿真计算。

本文根据实际需求建立一个超导电缆应用的模拟网架, 如图 6 所示。

图 6 所示的网架中主网为 110 kV 系统, 包括电源和两个串联供电的变电站, 总负荷 85 MW, 如果采用 35 kV 的三相共容型 HTS 电缆实现从电源到负荷端的直接供电, 就能够替代新建 110 kV 间隔和线路的工程。

模拟网架模拟了正常情况下负荷在主网和 HTS 电缆间的分布情况, 以及主网故障时 HTS 电缆功率变化情况, 如图 7 所示。

从图 7 可以看出 HTS 电缆正常运行时, 88% 的潮流都从超导电缆通过, 这反映了 HTS 电缆电阻较小和阻抗较低的特点。当 110 kV 线路出现单相暂时接地故障时, 超导电缆通过的潮流会快速增大至 125 MW, 显然电网故障时超导电缆承担了较大的短路电流, 但也说明只要合理设定保护定值, 将故障时间控制在一定范围内, 超导电缆就不会出现失超的情况。

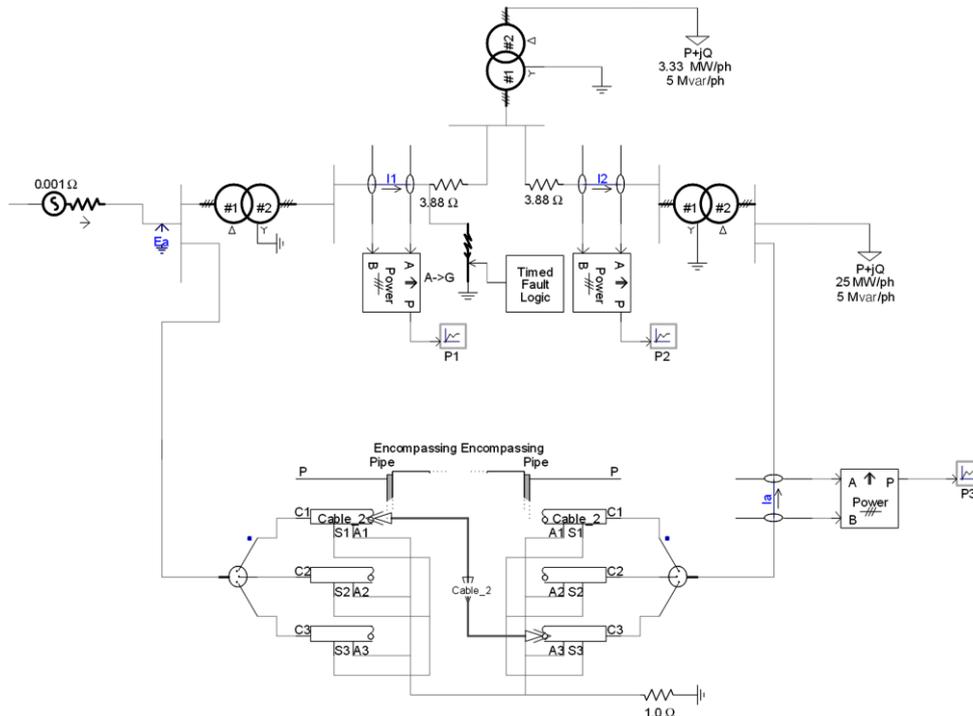


图 6 超导电缆模型应用仿真模型

Fig. 6 Application simulation model of superconducting cable model

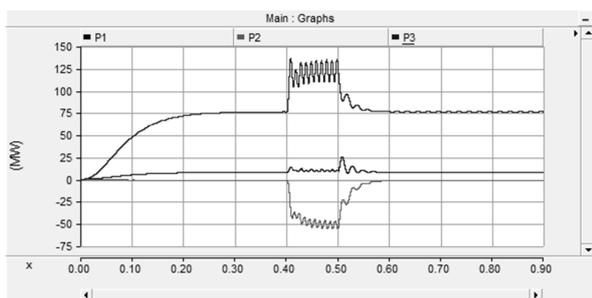


图 7 HTS 电缆负荷分配及故障暂态过程

Fig. 7 HTS cable load distribution and fault transient process

## 5 结论

本文阐述了配电 HTS 电缆结构和参数计算的基本问题, 构建了三相共容器型 HTS 电缆的电气参数模型, 讨论了 HTS 电缆工频参数计算的方法, 并利用构建的 HTS 电缆模型进行了典型电网暂态过程的模拟, 形成如下结论。

1) 提出了利用同轴电缆外层导体回流构建超导电缆电气模型的方法, 基于 PSCAD 软件通用电缆元件构建了 HTS 电缆模型, 该模型的工频电气参数在数值上与超导电缆的电气特性相当, 可以为工程设计和规划计算提供参考。

2) 基于输电工频参数试验的流程和公式, 提出了利用软件仿真计算 HTS 电缆工频参数的方法, 简化了 HTS 电缆的工频参数估算和建模工作。

3) 建立的两种配电网交流 HTS 电缆 PSCAD 模型在本文设定应用场景中能够反映 HTS 电缆的暂稳态基本特征, 可用于定值估计等规划期的工程需求。后续研究中, 还需要结合多种网架条件的仿真计算和工程实测, 才能给出更为准确的模型。

## 参考文献

- [1] 王银顺, 张翰. 高温超导电缆的研发现状和发展趋势[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(10): 8-18.  
WANG Yinshun, ZHANG Han. Developing status and trend of high temperature superconducting cable[J]. New Technology of Electrical Energy, 2017, 36(10): 8-18.
- [2] 雷俊玲, 叶新羽, 夏芳敏, 等. 高温超导电缆的发展现状[J]. 现代传输, 2018(5): 47-53.  
LEI Junling, YE Xinyu, XIA Fangmin, et al. Development status of HTS cable[J]. Modern Transmission, 2018(5): 47-53.
- [3] KANG R, UGLIETTI D, WESCHE R, et al. Quench simulation of REBCO cable-in-conduit conductor with twisted stacked-tape cable[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(1).
- [4] U.S. Department of Energy's Office of Electricity Delivery

and Energy Reliability. HTS cable projects[EB/OL]. [2019-07-25]. <https://www.energy.gov>.

- [5] International Electrotechnical Commission (IEC) Standard. Superconducting AC power cables and their accessories for rated voltages from 6 kV to 500 kV-test methods and requirements[S]. 2018.
- [6] 程锦闽, 汪惟源, 刘柏良, 等. 交流高温超导电缆构型研究综述[J]. 超导技术, 2019, 47(6): 45-50.  
CHENG Jinmin, WANG Weiyuan, LIU Bailiang, et al. Review of research on the configuration of AC high temperature superconducting cable[J]. Superconducting Technology, 2019, 47(6): 45-50.
- [7] 郭金明, 覃秀君, 李婧. 探究酸碱性环境对电缆绝缘老化的影响[J]. 绝缘材料, 2019, 52(5): 50-53, 58.  
GUO Jinming, QIN Xiujuan, LI Jing. Influence of acid and alkaline environment on ageing of cable insulation[J]. Insulation, 2019, 52(5): 50-53, 58.
- [8] 吴鹏. 110 kV 冷绝缘超导电缆导体设计[J]. 中国电力, 2015, 48(12): 161-165.  
WU Peng. Design of 110 kV CD superconducting cable conductor[J]. Electric Power, 2015, 48(12): 161-165.
- [9] 付瑜, 王银顺, 阚常涛, 等. 35 kV 低温绝缘超导电缆绝缘设计研究[J]. 超导技术, 2016, 44(12): 25-30.  
FU Yu, WANG Yinshun, KAN Changtao, et al. Research on insulation design of the 35 kV CD HTS cable[J]. Superconducting Technology, 2016, 44(12): 25-30.
- [10] KANG R, UGLIETTI D, WESCHE R, et al. Quench simulation of REBCO cable-in-conduit conductor with twisted stacked-tape cable[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(1).
- [11] American Superconductor Corporation, Nexans Deutschland Industries GmbH & Co. KG, Oak Ridge National Laboratory, Sumitomo Electric Industries, Ltd., Ultera. Very low impedance (VLI) superconductor cables: concepts, operational implications and financial benefits [EB/OL]. <https://www.ferc.gov>.
- [12] NOE M, STEMMLE M, SCHMIDT F, et al. Combined HTS cable and fault current limiter project in Germany[EB/OL]. <http://www.lscable.com>.
- [13] LS Cable. Superconducting cables[EB/OL]. [http://www.lscable.com/en/product/prod\\_view.asp?searchSeq=3102&searchCate=111&cate=101](http://www.lscable.com/en/product/prod_view.asp?searchSeq=3102&searchCate=111&cate=101).
- [14] JIPPING J, MANSOLDO A, WAKEFIELD C. The impact of HTS cables on power flow distribution and short circuit currents within a meshed network[C] // IEEE/PES 2001 Transmission and Distribution Conference and Exposition, October 28-November 2, 2001, Atlanta, CA, USA.

- [15] OGAWA J, FUKUI S, SUGAI M, et al. AC loss in each layer of three-layer twisted HTS cable[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5).
- [16] CHOI J H, PARK H, BALDICK R. Transmission investment and expansion planning for systems with high-temperature superconducting cables[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(8).
- [17] LEE C, KIM D, KIM S, et al. Thermo-hydraulic analysis on long three-phase coaxial HTS power cable of several kilometers[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5).
- [18] 宋文峰, 王倩, 李亚楠, 等. 基于双馈风电场低电压穿越的高温超导故障限流器建模及其参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 99-107.  
SONG Wenfeng, WANG Qian, LI Yanan, et al. Modeling and parameter optimization of HTS-FCL based on low voltage ride-through of doubly-fed wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 99-107.
- [19] DUAN N N, XU W J, WANG S H, et al. Quasi-3-D cylindrical coordinate XFEM model of HTS cable[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 55(6).
- [20] KOPYLOV S, BALASHOV N, DEGTARENKO P, et al. Investigation of HTS power transmission lines stability conditions in short-circuit model[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(8).
- [21] 赵铁军, 王秀斌, 虞跃. 基于金属护层模型参数辨识的电缆单相故障单端测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 83-91.  
ZHAO Tiejun, WANG Xiubin, YU Yue. A single terminal fault location method for single phase fault of cable based on parameter identification of metal sheath model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 83-91.
- [22] 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.
- [23] 金建勋, 游虎, 姜在强, 等. 高温超导电缆发展及其应用概述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(12): 17-28.  
JIN Jianxun, YOU Hu, JIANG Zaiqiang, et al. Development and application overview of high temperature superconducting cable[J]. Southern Power Grid Technology, 2015, 9(12): 17-28.
- [24] MASAYOSHI O, YOSHIHIRO I, KAZUAKI T, et al. Japan's first live power transmission using 3-in-one superconducting cable (high-temperature superconducting cable demonstration project)[J]. SEI Technical Review, 2013(76): 45-54.
- [25] Superconducting AC power cables and their accessories for rated voltages from 6 kV to 500 kV-test methods and requirements: IEC63075—2019[S].
- [26] AARON M. An investigation of the current distribution in an HTS triaxial power cable and its operational impacts on a power system[D]. Tennessee: University of Tennessee, 2005.
- [27] LEE S J, YANG H S. Recent progress and design of three-phase coaxial HTS power cable in Korea[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5): 121-128.
- [28] KIM S K, HA S K, PARK M, et al. Tri-axial core design of a distribution system class HTS power cable[J]. International Journal of Control and Automation, 2012, 5(3): 153-160.
- [29] HAMAJIMA T, YAGAI T, TSUDA M, et al. Current distribution analysis in tri-axial HTS cable considering three phases[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 1775-1778.
- [30] KIM S K, DINH M C, CHOI J, et al. Transposition-based connection scheme and joint box concept for a tri-axial HTS power cable[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 5(3): 1618-1626.
- [31] SUN S, YANG Q, YAN W. Optimal temporal-spatial PEV charging scheduling in active power distribution networks[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 379-388. DOI: 10.1186/s41601-017-0065-x.

收稿日期: 2019-10-18; 修回日期: 2020-03-19

作者简介:

兰莉(1987—), 女, 博士研究生, 工程师, 研究方向为电网规划和电力系统分析; E-mail: ll\_lan@126.com

赵文彬(1977—), 男, 通信作者, 工学博士, 高级工程师, 研究方向为设备状态管理。E-mail: wenbinmax@163.com

(编辑 葛艳娜)