

电缆—GIL 混合系统负载侧短路故障电压分布特性研究

范荣全^{1,2}, 曾文慧^{1,2}, 邹斌^{1,2}, 李果^{1,2}, 许文杰^{1,2}, 陈荣飞³

(1. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司, 成都 610041; 3. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 为满足四川地区清洁能源大规模外送的要求, 现拟采用隧道输电方式新建一条电缆—GIL 混合输电线路。隧道输电方式无法降低负载侧发生故障的风险, 当混合输电系统负载侧发生短路故障时, 其电压分布不同于正常输电线路。为明晰故障对混合输电线路电压分布的影响, 利用 EMTP-ATP 建立了混合输电模型, 在负载侧设置了不同类型的短路故障。当故障发生瞬间电缆护套会产生一个幅值极大的感应过电压, 越接近故障位置其电压峰值越大, 而随后的稳态峰值电压基本保持稳定; GIL 导体的非故障相电压相比与正常运行时下降, 故障相电压也呈现越靠近故障处波动越大的趋势。为混合输电系统的安全防护提供了参考。

关键词: 电缆—GIL 混合输电系统; 短路故障; 感应电压; EMTP-ATP

Characterization of Short-circuit Fault Voltage Distribution on Load Side of Cable-GIL Hybrid System

FAN Rongquan^{1,2}, ZENG Wenhui^{1,2}, ZOU Bin^{1,2}, LI Guo^{1,2}, XU Wenjie^{1,2}, CHEN Rongfei³

(1. Economic and Technical Research Institute of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China; 3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to meet the requirements of large-scale transmission of clean energy in Sichuan, a new cable-GIL hybrid transmission line is proposed to be built using tunnel transmission. The tunnel transmission method cannot reduce the risk of load-side faults, and when a short-circuit fault occurs on the load side of the hybrid transmission system, its voltage distribution is different from that of a normal transmission line. In order to clarify the effect of faults on the voltage distribution of the hybrid transmission line, a hybrid transmission model is established using EMTP-ATP, and different types of short-circuit faults are set up on the load side. When a fault occurs, the cable sheath generates an induced overvoltage with a great amplitude, and the closer to the fault location, the greater the peak voltage, while the subsequent steady-state peak voltage remains basically stable; the non-fault phase voltage of the GIL conductor decreases in comparison with the normal operation, and the fault phase voltage shows a trend of greater fluctuation the closer it is to the fault location. It provides a reference for the safety protection of hybrid transmission system.

Key words: cable GIL hybrid transmission system; short circuit fault; induced voltage; EMTP-ATP

0 引言

近年来, 为实现“3060”碳达峰、碳中和的“双碳”目标, 国务院就能源绿色低碳转型行动明确提出, 大力发展新能源, 全面推进风电、太阳能发电大规模开发和高质量发展, 坚持集中式与分布式并举, 加快建设风电和光伏发电基地^[1-5]。四川的凉山、甘孜、阿坝、攀枝花、雅安等西部地区具

有丰富的水电、光电资源^[6-8], 随着新能源开发技术日趋成熟, 发电成本显著降低, 这些地区水电、光电等清洁能源开发加快推进, 如何将新能源进行大规模外送成为了亟需解决的问题, 到 2022 年四川川电出口交直流线路主要为“五直八交”(8 回 500 kV 交流线路、5 回 800 kV 直流线路), 现有输电通道难以支撑清洁能源大规模外送的要求, 电网

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目资助项目(521996220002)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Sichuan Electric Power Company(521996220002).

瓶颈将凸显：因此亟需建设新的输电通道。

川西地区能源外送途经高原，横断山脉，在我国地势二三级阶梯交界处，容易受到地震，泥石流，洪涝等自然灾害的影响^[9-10]，相比于传统的架空线路组成的输电系统，隧道输电方式不受地形，以及大部分自然灾害的影响，并且能够避免线路由雷击或雷电感应等原因造成的短路故障。现有的隧道输电方式主要有电缆输电，以及 GIL(gas insulated transmission line)输电两种方式，其中 GIL 输电系统具有导体损耗低，使用寿命长等优势，但是由于 GIL 本身由刚性材料组成，其导体和绝缘子部位易受地震波影响^[11-13]跨过地震带地区时具有一定的安全隐患。电缆输电线路具有供电稳定、可靠性高，发生故障概率小等优点^[14]，但其电能损耗高。为应对四川西部地区地形复杂多变，且满足大规模新能源外送需要，现拟新建一条依靠隧道输电的 500 kV 交流电缆-GIL 混合输电线路。

文[15-17]究了架空线-GIL 混合系统短路电流分布特性，发现输电侧发生接地故障时，GIL 管廊内三相导线电流的增强倍数在 1.01~2.08 倍之间；在 GIL 管廊内部发生故障时，GIL 管廊内三相导线电流的增强倍数在 1.05~21.58 倍之间。此外，还用 ATP-EMTP 和 MATLAB 程序计算了 GIL 三相导线外壳的环流值约为导线电流的 75%。文[18]探究了导流排布置数量、接地点间距对外壳电位及接地点入地电流的影响，发现 GIL 外壳电位呈现出端部高中间低的“V”字形分布，GIL 端部设置导流排、增加接地点数目和减小接地点间距可以降低外壳电位和减小接地点入地电流。文[19]发现不同布置方式对电缆的电容矩阵没有影响，在护套两端接

地的条件下，将金属护套进行交叉互联，会使得电缆线路的正序阻抗增加，而对零序阻抗没有影响。

目前对于单一的电缆、GIL 输电线路，架空线-GIL 混合输电线路的故障特性研究已经较为充分，但对于电缆-GIL 混合输电方式目前鲜有研究。

为探究电缆-GIL 混合输电线路负载侧发生短路故障时的电压分布特性，文中通过 EMTP-ATP 软件建立了混合输电线路模型，分别设立了单相短路故障、两相短路故障以及三相短路故障以探究电缆侧护套感应电压以及 GIL 段导体电压的故障特性，为电缆-GIL 混合输电系统的安全性提供了技术支撑。

1 电缆-GIL 混合系统模型

在 EMTP-ATP 中建立电缆-GIL 混合系统等效仿真模型。线路的系统模型等效图见图 1。其中电源采用工频电压源模拟电缆入线侧导线电压。

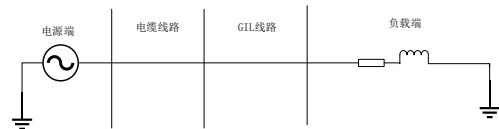


图 1 混合输电线路等效图

Fig. 1 Hybrid transmission line equivalent diagram

1.1 模型参数选择

在混合输电系统中电缆选择型号为 FY-YJLW03-Z290/500 1×2 500 的 500 kV 交联聚乙烯电缆，相关参数见表 1。

表 1 电缆参数

Table 1 Cable parameters	mm
类别	参数
导体外径	61.2
导体屏蔽层直径	66.8
交联聚乙烯绝缘直径	128.8
绝缘屏蔽直径	131.8

皱纹铝护套外径	165.1
外护套直径	177.1

GIL 选择 500 kV GIL 产品，其系统标称电压的有效值为 500 kV，额定电压的有效值为 550 kV，绝缘介质为 SF₆，500 kV GIL 典型参数见表 2。

表 2 GIL 参数

Table 2 GIL parameters	mm
类别	参数
导体外径	140
导体厚度	15
壳体外径	516
壳体厚度	8

1.2 电缆-GIL 混合模型参数设置

1)电源模块。电源模块采用 EMTP-ATP 中的电压源模型，频率设置为 50 Hz，电压源的内自感设置为 $L=25$ mH。三相电源尾端经星形连接后中性点接地，三相交流电压源有效值设置为 $500 \times 1.05 = 525$ kV。

2)电缆与 GIL 模块。电缆和 GIL 模块采用 EMTP-ATP 中的 LCC 模块模拟，电缆和 GIL 模块均采用双回路电缆设置，每一小段采用一个 LCC

模块进行模拟，模型均为 PI 型等效电路。土壤电阻率为 $500 \Omega \cdot m$ ，接地电阻设置为 0.5Ω 。

3)负载模块。所选截面 2500 mm^2 电缆最大允许的电流载流量的有效值为 1788 A，由于同电压等级的 GIL 线路容量大于电缆线路。固以电缆的最大载流量为标准，使混合输电线路的稳态载流量处于电缆电流最大允许量的 50%~80%之间。同时使输电系统总无功功率趋近于平衡，通过设置不同的负载阻抗对仿真模型进行调试，最终设定阻抗参数为 $R=500 \Omega$ ， $L=150$ mH，每一回路的稳态载流量为 1025 A。

EMTP-ATP 混合输电线路的仿真模型见图 2。

采用工频电压源模块模拟变电站出线侧的导线电压并与电缆线路相连，不同电缆模块护套之间通过交叉互联方式进行连接，在电缆线路末端连接 GIL 线路并在 GIL 线路末端接入负载等效阻抗。

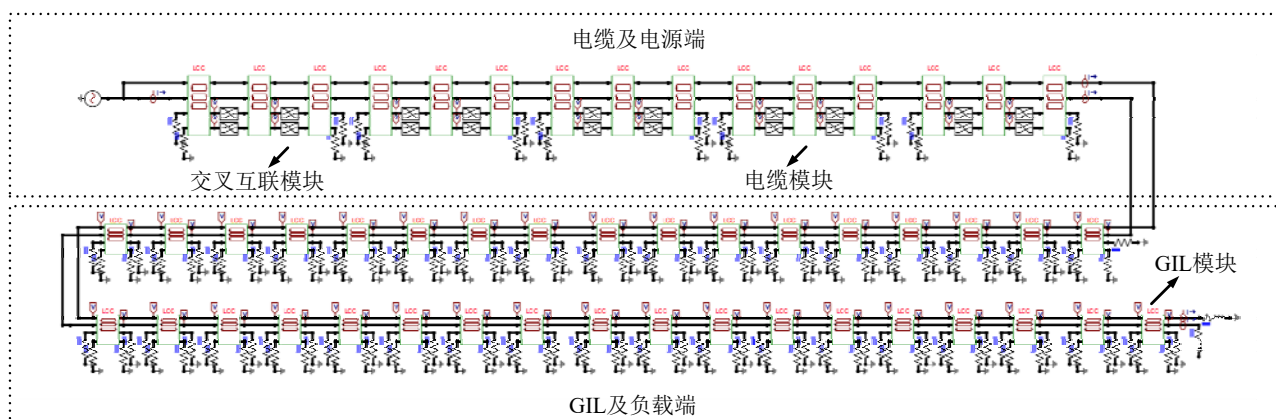


图 2 电缆-GIL 混合输电线路仿真模型图

Fig. 2 Simulation model of cable-GIL hybrid transmission line

2 电缆段感应电压分析

2.1 正常运行时电缆感应电压

设定仿真步长 $\Delta t=10^{-6}$ s, 仿真时间 $T=0.1$ s, 仿真模型中为保证电缆护套感应电压低于 300 V, 并综合考虑道路运输条件的制约, 电缆模型采用每 500 m 一段, 电缆每 500 m 进行一次护套交叉换

位, 1.5 km 进行一次两端接地。同时为保证 GIL 外壳电位低于 50 V, GIL 接地间隔设置为 100 m, 即单个 GIL 模块的长度为 100 m 一段。对于电缆交叉互联线路, 通过简化计算的方法, 将实际工程中的分布式参数简化为集中参数, 忽略电容电流等影响因素, 可以将其简化为图 3^[20]。

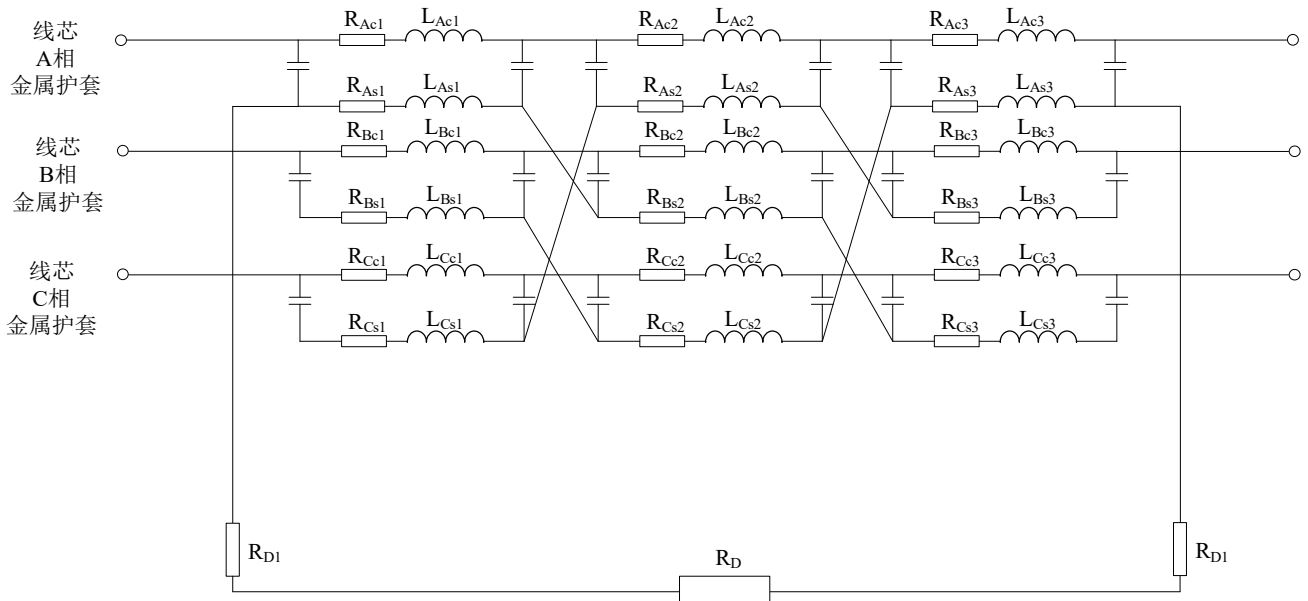


图 3 电缆交叉互联等效模型图

Fig. 3 Cable cross-interconnection equivalent model diagram

图 3 中: R_{Nc_i} 和 L_{Nc_i} 分别表示第 N 相 i 段电缆线芯上的等效电阻和电感; R_{Ns_i} 和 L_{Ns_i} 分别表示第 N 相 i 段电缆护套上的等效电阻和电感; R_{D1} 表示接地电阻; R_D 表示大地漏阻。由于电缆护套之间的交叉互联, 护套之间形成了延 $R_{As1}-R_{Bs2}-R_{Cs3}$ 、 $R_{Bs1}-R_{Cs2}-R_{As3}$ 、 $R_{Cs1}-R_{As2}-R_{Bs3}$ 的 3 条回路, 由于三相感应电压的相角差为 120° , 合成电压接近于零。因此正常运行情况下的电缆护层环流和感应电压保持稳定, 但发生故障后, 故障相与大地之间的绝缘遭到破坏, 将引起电压和电流产生较大变化。线路正常运行时电缆交叉互联点的感应电压见图

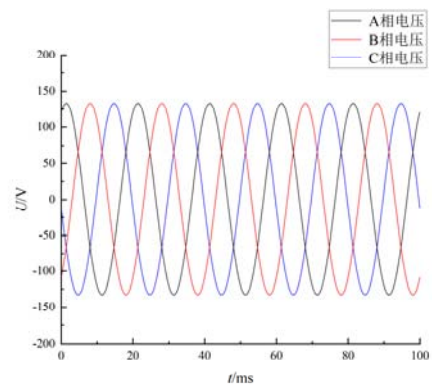


图 4 线路正常运行时的护套感应电压

Fig. 4 Sheath induced voltage during normal line operation

混合输电线路正常运行时交叉互联点处, 金属护套产生的感应电压最大值约为 130 V, 满足 GB 50217—2007 的要求。

2.2 短路故障时电缆感应电压

为探究混合输电线路发生短路故障时对电缆护套感应电压的影响，在混合输电线路负载的一回处分别设置单相短路故障，两相短路故障和三相短路故障，短路发生时间为 $T=0.02$ s。

当故障发生瞬间故障相线芯上的电流迅速增大，由于线芯与金属护套之间的耦合作用，引发金属护套上产生一个强瞬态电压峰值^[21]，瞬态峰值持续时间较短，随后由于短路故障设置为永久短路故障，故障相线芯会产生正弦电流，除了产生较高的暂态过电压外，稳态时三相金属护套上还存在正弦波型的过电压^[22]。电缆护套第一个交叉互联点处故障电压波形见图 5-7。

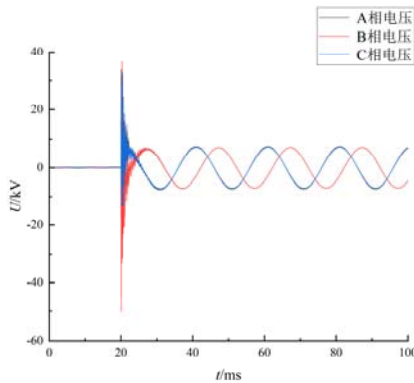


图 5 单相短路故障时护套感应电压

Fig. 5 Sheath induced voltage during single-phase short-circuit faults

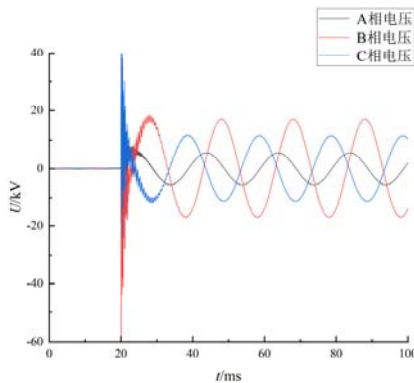


图 6 两相短路故障时护套感应电压

Fig. 6 Sheath induced voltage during two-phase short-circuit faults

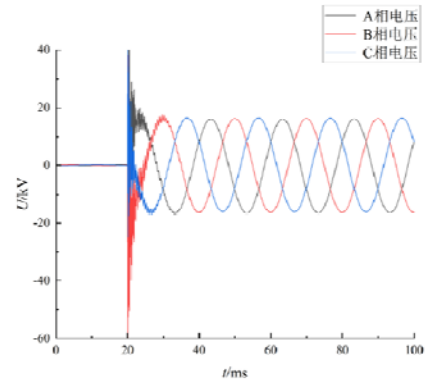


图 7 三相短路故障时护套感应电压

Fig. 7 Sheath induced voltage during three-phase short-circuit faults

1)发生单相短路故障时，故障发生瞬间电缆护套会产生一个幅值极高的过电压，其暂态正峰值电压达到 34.6 kV，暂态负峰值电压达到 51.0 kV，紧接着感应电压波形会进入一个大概 10 ms 的震荡阶段，震荡阶段结束以后电压波形进入稳态阶段，非故障的两相进入稳态阶段的护套感应电压幅值和相位相似，而故障相电压与非故障相电压相位有明显差别。

2)发生两相短路故障时，同样会产生一个幅值极高的暂态过电压，其暂态正峰值为 39.1 kV，暂态负峰值为 58.2 kV，与单相短路故障不同，电压进入稳态阶段后三相波形的相位和幅值存在明显差异。

3)发生三相短路故障时。由于三相同同时发生接地短路，其产生的短路类型为对称短路，发生三相短路故障的概率最小，但是通常三相短路的短路电流最大，产生的危害最大，其电缆护套感应电压的暂态正峰值为 38.9 kV，暂态负峰值为 58.8 kV，进入稳态阶段后产生的电压波形为三相对称波形其稳态峰值电压 16.2 kV。

2.3 短路故障下电缆感应电压分布

从混合输电线路始端开始对电缆的 10 个交叉互联点每一处护套感应电压的暂态正峰值、暂态负

峰值以及稳态峰值进行了测量。其不同测量点产生的电压波形与上图类似。不同位置感应电压参数见表 3。

表 3 故障线路电缆护套各交叉互联点处感应电压

Table 3 Induced voltage at each cross-interconnection point of cable sheath of faulty line

故障类型	位置	感应电压/kV									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
单相短路故障	暂态正峰值	34.6	45.2	37.1	44.1	38.5	56.0	48.4	59.7	69.0	94.0
	暂态负峰值	51.0	28.5	50.5	36.8	60.5	45.0	66.8	58.8	78	92.2
	稳态峰值	7.8	7.8	7.7	7.7	7.1	7.8	7.5	8.0	7.8	8.1
两相短路故障	暂态正峰值	39.1	54.9	49.7	58.6	63.2	73.3	67.8	89.2	104.2	139.6
	暂态负峰值	58.2	39.2	65.2	38.7	70.0	48.9	88.3	62.0	98.7	91.1
	稳态峰值	16.2	17.0	17.1	17.3	17.2	16.9	17.2	16.8	16.2	16.3
三相短路故障	暂态正峰值	38.9	59.1	47.8	65.6	55.6	84.1	71.2	90.5	102.4	141.8
	暂态负峰值	58.8	41.2	74.8	52.3	89.7	66.0	98.4	86.0	116.5	135.1
	稳态峰值	16.2	16.7	16.1	16.2	16.3	17.1	15.3	16.5	16.3	16.1

电缆护套感应电压变化曲线见图 8-10，从图 8-10 可以看到暂态正峰值电压与暂态负峰值电压基本呈现上升趋势，且在每一分段电缆内暂态正峰值电压上升，而暂态负峰值电压下降，且电缆分段越靠近故障发生位置其暂态电压峰值是上升的，这是由于短路点在发生在混合输电线路的电缆端以外，且距离变远时电缆的三相电流波动呈现变小的趋势。对于单相短路故障电压的稳态峰值，其大小基本不发生变化稳定在 7.8 kV 左右。对于两相短路故障和三相短路故障其稳态峰值维持在 16.5 kV 左右，为防止负载侧发生短路故障时导致的电缆端护套暂态环流过大大情况，可以考虑在接近负载端的电缆护套接地处采用敷设降阻剂，优化接地网设计等降阻措施。

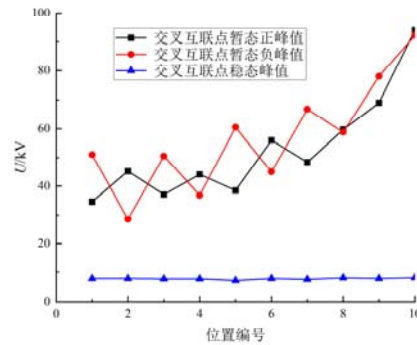


图 8 单相短路故障回路电缆护套感应电压变化趋势
Fig. 8 Trend of induced voltage in cable sheath of single-phase short-circuit fault circuit

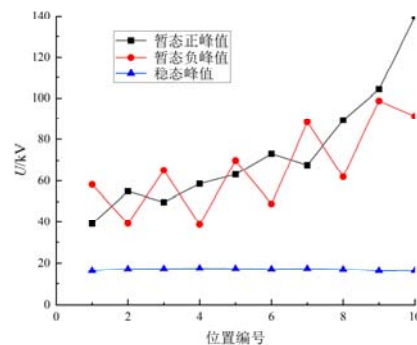


图 9 两相短路故障回路电缆护套感应电压变化趋势
Fig. 9 Trend of cable sheath induced voltage in two-phase short-circuit fault circuits

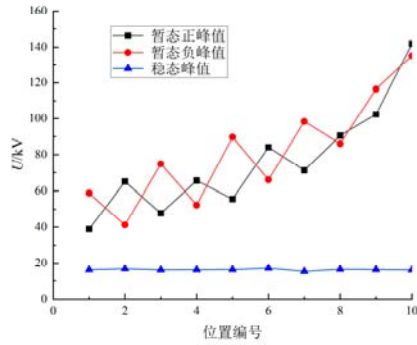


图 10 三相短路故障回路电缆护套感应电压变化趋势
Fig. 10 Trend of cable sheath induced voltage in three-phase short-circuit fault circuits

3.GIL 段故障电压分析

3.1 短路故障下 GIL 电压分析

保持仿真步长 $\Delta t=10^{-6}$ s, 仿真时间 $T=0.1$ s, 在 0.02 s 时在混合输电线路负载处设置单相短路故障, 并测量线路单相接地故障时, 混合输电线路 GIL 段首端电压值见图 11。

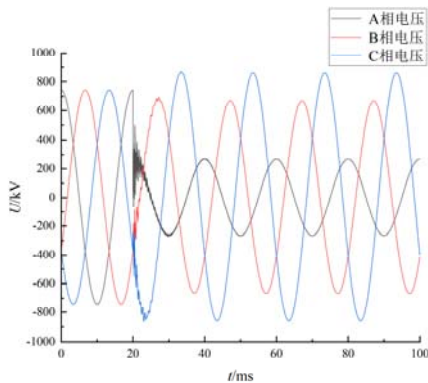


图 11 单相接地故障故障回路 GIL 电压波形
Fig. 11 Single-phase ground fault fault circuit GIL voltage waveforms

由图 11 可知, 在单相接地故障发生瞬间电压会进入一个震荡阶段, 震荡持续时间差不多为 7 ms, 震荡阶段结束之后, 电压值会进入稳态阶段, 稳态电压峰值分别约为 270、870、672 kV, 其中发生短路故障相的电压会明显变小。

接下来保持仿真步长, 仿真时间不变, 在输电线路负载位置分别设置两相接地故障, 三相接地故

障, GIL 首端电压波形见图 12、13。

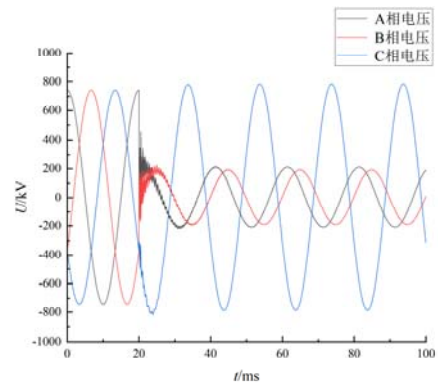


图 12 两相接地短路故障回路 GIL 波形
Fig. 12 GIL waveform of two-phase grounded short-circuit fault circuit

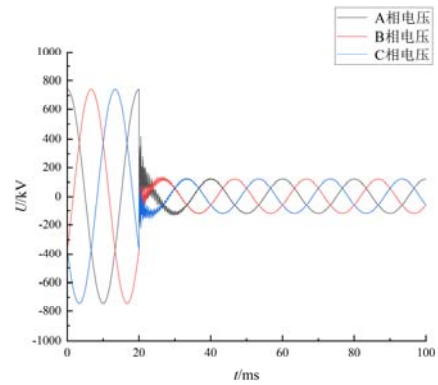


图 13 三相接地短路故障回路 GIL 波形
Fig. 13 GIL waveform of three-phase grounded short-circuit fault circuit

在两相短路故障情况下, 故障发生瞬间始端电压进入震荡状态, 震荡持续时间约为 10 ms, 震荡结束之后故障相电压明显下降, 非故障相电压略微上升, 其三相电压稳态峰值分别约为 785、211、193 kV, 相比于两相短路故障三相短路故障发生时, 电压震荡时间更长为 13 ms, 电压进入稳态时其峰值分均为 150 kV 左右且由于三相同同时发生短路故障, 电压进入稳态阶段时其相位差基本保持不变。

3.2 短路故障下 GIL 段电压分布趋势

为探究短路故障对 GIL 段电压分布的影响, 现分别统计单相短路故障, 两相短路故障, 三相短

路故障时距离故障发生点不同位置处的 GIL 故障 上 图 类 似 。
电压稳态峰值见表 4，其不同位置处的电压波形与

表 4 短路故障下 GIL 导体稳态电压峰值分布

Table 4 Distribution of peak steady-state voltage of GIL conductor under short-circuit failure

距离/km	GIL 段电压峰值/kV								
	单相短路故障			两相短路故障			三相短路故障		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
0.5	60.3	780.3	958.2	41.2	21.3	903.2	27.1	27.2	27.1
1.0	82.1	748.2	942.9	62.2	58.8	886.2	40.2	40.3	40.0
1.5	123.2	728.1	833.1	114.2	98.2	860.3	58.2	58.1	58.1
2.0	152.8	713.8	893.2	149.2	137.3	848.2	74.1	74.1	74.2
2.5	193.1	690.7	890.2	175.5	158.4	836.6	87.1	87.3	87.3
3.0	248.2	675.5	888.2	203.3	170.2	808.4	114.1	114.2	114.1
3.5	270.1	672.3	870.2	211.2	193.1	785.1	150.1	150.1	149.9

短路故障情况下，GIL 导体的电压变化趋势见

during two-phase short circuit faults

图 14-16。

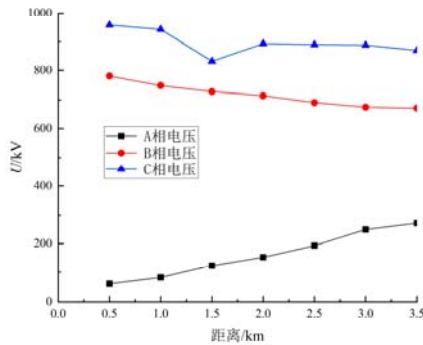


图 14 单相短路故障时 GIL 导体稳态峰值电压变化趋势

Fig. 14 Trend of steady-state peak voltage of GIL conductor during single-phase short-circuit faults

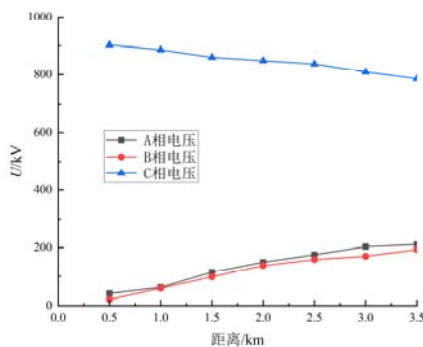


图 15 两相短路故障时 GIL 导体稳态峰值电压变化趋势

Fig. 15 Trend of steady state peak voltage of GIL conductor

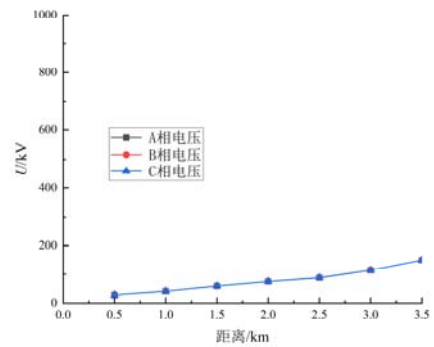


图 16 三相短路故障时 GIL 导体稳态峰值电压变化趋势

Fig. 16 Trend of steady state peak voltage of GIL conductor during three-phase short circuit fault

由图 14-16 可知，在单相短路故障发生时，其故障相电压随着与故障点距离的增加而增加由 60.3 kV 逐步增加至 270.1 kV，而非故障相电压分别由 780.3~672.3 kV、958.2~870.2 kV 逐步下降，两相短路故障时也基本遵循此规律，其中故障相电压分别由 41.2~211.2 kV、21.3~193.1 kV 逐步上升，故障相电压由 903.2~785.1 kV 逐步下降，三相短路故障发生时，由于其在进入稳态阶段后三相电压仍然保持对称性，故其三相电压的变化趋势与电压值基本相同，约从 27~150 kV。

对于 GIL 段忽略壳体相间导流, 对地容升等影响因素, 其可以简化为图 17^[16]。

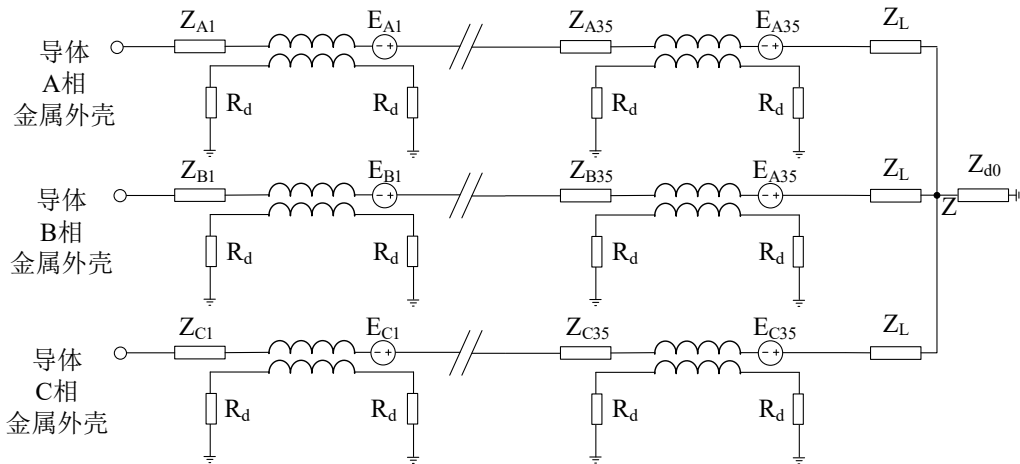


图 16 GIL 段等效模型图

Fig. 17 Trend of steady state peak voltage of GIL conductor during two-phase short circuit faults

图 17 中: Z_L 、 Z_{d0} 、 R_d 分别表示负载阻抗、中性点接地阻抗、外壳接地电阻; Z_{NI} 、 E_{NI} 分别表示第 N 相第 I 个 GIL 导体的等效阻抗和 N 相第 I 个 GIL 导体上产生的相间感应电势。当短路故障发生时, 一方面 Z 点电位将不为 0, 三相电压的对称性被破坏, 导致一部分电流从非故障相流向故障相的短路位置, 使非故障相的电压波形幅值升高; 另一方面, 短路故障发生时, GIL 的非故障相将处在由故障相引发的强磁场中^[23], 不同相之间的互耦合作用较强, 并使 GIL 非故障相的相间感应电势 E_{NI} 迅速上升, 使流过非故障相的电流上升。

在发生短路故障时故障相的电压稳态值会随着与故障的距离增加而上升, 这是由于当 GIL 末端即负载侧发生短路故障时, 线路某处电压主要由该处前后混合输电线路的阻抗分压来决定的。而非故障相电压会随着与故障点的距离增加下降, 这是由于随着距离增加相间感应电势带来的电压升高减弱导致的。

4 结论

本文通过 EMTP-ATP 软件建立了 GIL-电缆混

合输电模型, 并通过模拟负载侧发生短路故障的情形, 分析了短路故障对混合输电线路上的电压分布影响, 得出了如下结论:

- 1) 电缆分段越靠近故障发生位置其护套感应电压的暂态电压峰值上升, 稳态峰值基本不发生变化, 且单相短路故障下的电压稳态峰值明显小于两相短路故障和三相短路故障。
- 2) 发生短路故障时, GIL 导体的非故障相电压相比于正常运行时上升, 且电压随着与故障点距离的增加而下降; 而故障相电压遵循与故障点距离的增加而增加的趋势。

参考文献:

- [1] 潘玲颖, 陈锦奇, 柴博涵. “双碳”目标下新能源发电产业集聚对区域绿色发展的影响研究[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11): 1051-1060.
PAN Lingying, CHEN Jinqi, CHAI Bohan. Research on the impact of new energy power generation industry agglomeration on regional green economic efficiency[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11): 1051-1060.
- [2] 王哮江, 刘鹏, 李荣春, 等. “双碳”目标下先进发电技术研究进展及展望[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 52-59.
WANG Xiaojiang, LIU Peng, LI Rongchun, et al.

- Research progress and prospects of advanced power generation technology under the goal of Carbon emission peak and Carbon neutrality[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(1): 52-59.
- [3] 李庆民, 于万水, 赵继尧. 支撑“双碳”目标的风光发电装备安全运行关键技术[J]. *高电压技术*, 2021, 47(9): 3047-3060.
- LI Qingmin, YU Wanshui, ZHAO Jiyao. Key technologies for the safe operation of wind and solar power generation equipment in support of the “peak CO₂ emissions and Carbon neutrality” policy[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(9): 3047-3060.
- [4] 刘春景, 吕建焱, 赵汶畅, 等. 两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析[J]. *环境科学*, 2022, 43(7): 3375-3385.
- LIU Chunjing, LYU Jianyi, ZHAO Menchang, et al. Development scenarios and environmental benefits analysis of future power generation industry under two modes in China[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(7): 3375-3385.
- [5] 杜冬梅, 曹冬惠, 何青. 目标下我国电力行业低碳转型的思路探讨[J]. *热力发电*, 2022, 51(10): 1-9.
- DU Dongmei, CAO Donghui, HE Qing. Discussion on low-carbon transformation of China's power industry under the “double-Carbon goal” [J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(10): 1-9.
- [6] 彭春凝. 四川新能源产业发展的配套政策法规研究[J]. *理论与改革*, 2014(5): 83-87.
- PENG Chunqing. Research on supporting policies and regulations for the development of Sichuan's new energy industry[J]. *Theory and Reform*, 2014(5): 83-87.
- [7] 陈军华, 李心, 温馨. 我国地方新能源产业发展的现状及支撑机制创新研究[J]. *探索*, 2013(4): 98-102.
- CHEN Junhua, LI Xin, WEN Xin. Research on the current situation and support mechanism innovation of local new energy industry development in China[J]. *Probe*, 2013(4): 98-102.
- [8] 陈刚, 丁理杰, 韩晓言, 等. 抽水蓄能在四川电网的应用前景展望[J]. *四川电力技术*, 2022, 45(2): 1-6.
- CHEN Gang, DING Lijie, HAN Xiaoyan, et al. Investigation into application prospects of pumped storage in Sichuan power grid[J]. *Sichuan Electric Power Technology*, 2022, 45(2): 1-6.
- [9] 白永健, 铁永波, 孟铭杰, 等. 川西地区地质灾害发育特征与时空分布规律[J]. *沉积与特提斯地质*, 2022, 42(4): 666-674.
- BAI Yongjian, TIE Yongbo, MENG Mingjie, et al. Characteristics and temporal-spatial distribution of geohazards in western Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2022, 42(4): 666-674.
- [10] 范宣梅, 方成勇, 戴岚欣, 等. 地震诱发滑坡空间分布概率近实时预测研究——以2022年6月1日四川芦山地震为例[J]. *工程地质学报*, 2022, 30(3): 729-739.
- FAN Xuanmei, FANG Chengyong, DAI Lanxin, et al. Near Real time prediction of spatial distribution probability of earthquake-induced landslides—Take the Lushan earthquake on June 1 2022 as an example [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(3): 729-739.
- [11] 李晓璇, 卿东生, 刘匀, 等. 特高压换流站气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)地震响应分析[J]. *高电压技术*, 2021, 47(10): 3650-3656.
- LI Xiaoxuan, QING Dongsheng, LIU Yun, et al. Seismic response analysis of gas insulated transmission lines in UHV converter station[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(10): 3650-3656.
- [12] 肖登明, 阎究敦. 气体绝缘输电线路(GIL)的应2用及发展[J]. *高电压技术*, 2017, 43(3): 699-707.
- XIAO Dengming, YAN Jiudun. Application and development of gas insulated transmission line (GIL)[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(3): 699-707.
- [13] 李庆民, 李伯涛, 王健, 等. 气体绝缘金属封闭输电线路地震响应的薄弱部位及其响应规律[J]. *高电压技术*, 2015, 41(5): 1437-1445.
- LI Qingmin, LI Baitao, WANG Jian, et al. Weak parts of gas insulated transmission line under seismic response and its response regularity[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(5): 1437-1445.
- [14] 周远翔, 赵健康, 刘睿, 等. 高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J]. *高电压技术*, 2014, 40(9): 2593-2612.
- ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(9): 2593-2612.
- [15] 汤亮亮, 吕金煌, 谭进, 等. 架空线-GIL混合系统短路电流分布特性研究[J]. *高压电器*, 2021, 57(9): 34-42.
- TANG Liangliang, LYU Jinhuan, TAN Jin, et al. Study on short circuit-current distribution characteristics of overhead transmission line-GIL hybrid transmission

- system[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(9): 34-42.
- [16]汤亮亮, 蔡 炜, 王琼芳, 等. GIL 管廊接地系统环流特性及影响因素[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2098-2105.
- TANG Liangliang, CAI Wei, WANG Qiongfang, et al. Circulation characteristics and influencing factors of GIL grounding system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2098-2105.
- [17]汤亮亮, 刘 刚, 吴 敏, 等. GIL 管廊结构参数对接地系统电气特性参数的影响[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 3032-3038.
- TANG Liangliang, LIU Gang, WU Min, et al. Influence of GIL tube structure parameters on electrical characteristics of grounding system[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 3032-3038.
- [18]王亚楠, 丁卫东, 苟 杨, 等. 气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)接地问题探讨[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 98-102.
- WANG Yanan, DING Weidong, GOU Yang, et al. Discussion of the grounding method of gas insulated transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 98-102.
- [19]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.
- [20]赖胜杰, 夏成军, 池梓斌, 等. 考虑泄漏电流及层间耦合的高压电缆金属护套环流计算与分析[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 793-803.
- LAI Shengjie, XIA Chengjun, CHI Zibin, et al. Calculation and analysis of circulating current in metal sheath for HV cable considering leakage current and interlayer coupling[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 793-803.
- [21]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.
- [22]梁型淦, 王昱力, 张 磊. 220 kV 电缆护套单相接地故障过电压特性[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(6): 747-751.
- LIANG Xinggan, WANG Yuli, ZHANG Lei. Sheath overvoltage characteristics for single-phase ground fault in 220 kV power cable[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(6): 747-751.
- [23]赵 军, 陈维江, 边 凯, 等. 特高压 GIL 管廊短路故障条件空间磁场分布特性[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1866-1871.
- ZHAO Jun, CHEN Weijiang, BIAN Kai, et al. Distribution characteristics of spatial magnetic field in UHV GIL gallery in short-circuit fault condition[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1866-1871.
- 范荣全(1966—), 男, 硕士研究生, 教授级高级工程师, 研究方向为柔性输电、智能电网、设备在线监测、电网防灾减灾、新型电力系统等方面的科学理论和工程应用。
- 陈荣飞(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: 3071840043@qq.com)。