

海上220 kV海缆操作过电压研究

陈翰博, 刘树慰, 张恒旭

(海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451)

摘要: 海上平台电力系统是整个海上油气田开发工程中不可或缺的一部分, 其中海缆作为电力系统的重要组成部分之一, 肩负着输送电能, 并将系统中各个设备连接成完整有机体的重要任务, 其安全性与运行可靠性对于整个海上油气田平台至关重要。针对此, 结合渤海海域某海上平台开发方案, 基于 CloudPSS 云平台对不同短路容量下海缆合闸过电压进行仿真分析, 并引入并联电抗器抑制其合闸过电压, 为海洋工程电力系统海缆选型与参数设定提供理论依据。

关键词: 海缆; 短路容量; 操作过电压; CloudPSS

Study on operation overvoltage of 220 kV submarine cable

CHEN Hanbo, LIU Shuwei, ZHANG Hengxu

(Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

Abstract: The offshore platform power system is an indispensable part of the entire offshore oil and gas field development project. The submarine cable, as one of the important components of the power system, is responsible for transmitting electrical energy and connecting various devices in the system into a complete organism. Its safety and operational reliability are crucial to the entire offshore oil and gas field platform. In view of this, based on the development plan of an offshore platform in the Bohai Sea, the closing overvoltage of the submarine cable under different short-circuit capacities is simulated and analyzed based on the CloudPSS cloud platform, and shunt reactor is introduced to suppress the closing overvoltage, which provides a theoretical basis for the selection and parameter setting of submarine cables for marine engineering power systems.

Keywords: submarine cable; short-circuit capacity; operation overvoltage; CloudPSS

0 引言

随着海洋油田开发规模越来越大, 海上平台电力系统的结构趋于复杂, 对海上油气田供电可靠性与连续性要求也愈加严格。海底电缆作为海上平台电力系统中重要一环, 肩负着电能输送

的重要作用, 并将电源、变压器、用电设备连接成一个有机的整体, 使电力系统能够稳定安全工作^[1-2]。

海底电缆相对于架空线路与陆地电缆等输电线路, 其分布电容更大, 对地电容电流更大, 海

缆末端容升效应更加明显。由于海缆的这些特殊性，在输电过程中将会出现过电压现象，导致无功补偿复杂及输送容量受限等问题，严重时过电压将击穿海底电缆，导致平台电力中断，影响油田正常生产^[3]，因此对于海缆进行电磁暂态过电压的研究十分重要。

目前大多数过电压研究均是针对架空线路和陆地电缆的研究，对于海底电缆过电压研究不多，而对于海底电缆过电压影响因素的研究更是很少。文献[4-5]主要进行了海缆合闸过电压的研究，并给出了一定的限制措施，但是未分析出海缆过电压的影响因素；文献[6]以海上风电直流海缆为研究对象，分析了不同故障类型下海缆过电压，但是未分析系统参数对海缆过电压的影响，且其研究对象主要为直流海缆，对于常用的交流海缆未进行分析研究。

本文以220 kV交流海缆为研究对象，结合渤海海域某海上平台，在CloudPSS中搭建系统电磁暂态仿真模型，研究系统短路容量对海缆操作过电压影响情况，并提出抑制海缆过电压的具体措施，为海缆参数选型以及系统稳定性分析提供依据。

1 仿真建模

以渤海海域某海上平台为分析案例，建立系统电磁暂态仿真模型。本工程陆地新建一座220 kV变电站，接入220 kV电网，新建变电站规划出线6回，本期出线5回，备用1回。海上本期新建3座220 kV电力动力平台（EPP），1座110 kV EPP。3座220 kV电力动力平台分别通过1回登陆海底电缆接入陆地新建变电站，1座110 kV电力动力平台通过海缆与其中1座220 kV电力动力平台互联，不同海上电力动力平台之间通过1回海底电缆互联，以保证任一海缆故障的情况下，通过剩余的海缆实现供电，保证供电连续性与安全性，对应的系统结构如图1所示，变压器参数见表1，海缆三芯截面示意图如图2所示，结构参数表2。

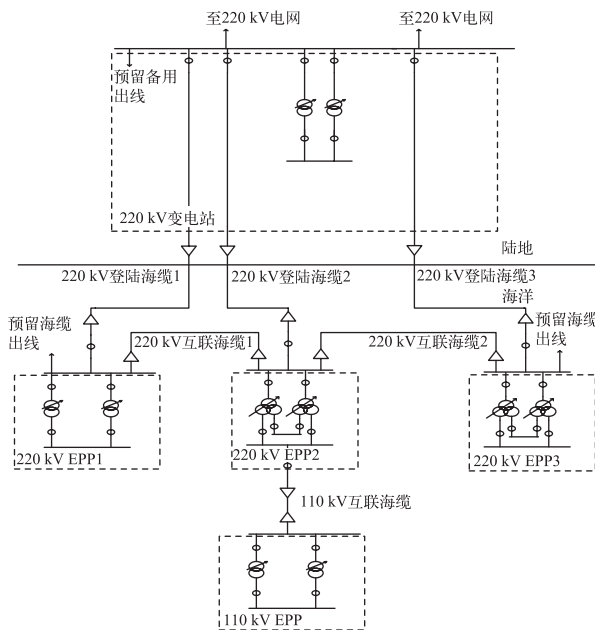


图1 系统结构图

Fig. 1 System structure diagram

表1 变压器参数

Tab. 1 Transformer parameters

220 kV 陆上变电站	三相双绕组，油浸式有载调压，冷却方式 ONAN/ONAF，YNd11，63 Mvar，220/35 kV
220 kV EPP1	三相双绕组，油浸式有载调压，冷却方式 ONAN/ONAF，YNd11，2×120 Mvar，220/35 kV
220 kV EPP2	三相三绕组有载调压，本体和散热器分别布置，自冷 2×150 Mvar，220/115/35 kV
220 kV EPP3	三相三绕组有载调压，本体和散热器分别布置，自冷 2×140 Mvar，220/35/10.5 kV
110 kV EPP	三相双绕组，油浸式有载调压，冷却方式 ONAN/ONAF，YNd11，2×90 Mvar，110/35 kV

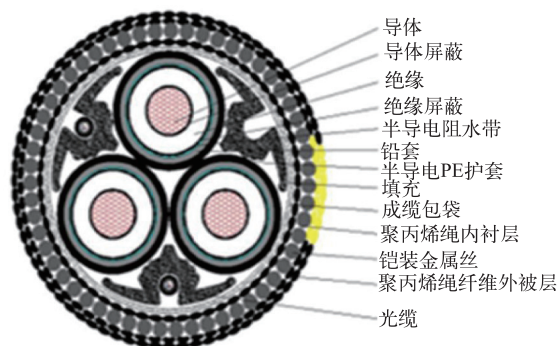


图2 海缆截面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of submarine cable section

表 2 海缆结构参数
Tab. 2 Structural parameters of submarine cable
(单位: mm)

	220 kV 登陆海 缆 1 近 似外径	220 kV 登陆海 缆 2 近 似外径	220 kV 登陆海 缆 3 近 似外径	220 kV 互联海 缆 1 近 似外径	220 kV 互联海 缆 2 近 似外径	110 kV 互联海 缆近似 外径
导体	38.5	38.5	38.5	26.6	23.4	26.6
导体 屏蔽	43.8	43.8	43.8	31.5	28	30
绝缘	91.8	91.8	91.8	85.5	82	64
绝缘 屏蔽	94.2	94.2	94.2	87.9	84.4	66
半导体 阻水带	96.2	96.2	96.2	89.9	86.4	68
铅套	103.6	103.6	103.6	96.9	93.4	73.6
半导体 PE 护套	110.4	110.4	110.4	103.5	99.8	79.1
聚丙烯 绳内衬 层	243.3	243.3	243.3	228.3	220.3	175.7
铠装金 属丝	255.3	255.3	255.3	240.3	232.3	187.7
聚丙烯 绳纤维 外被层	263.3	263.3	263.3	248.3	240.3	195.7
光缆	-	-	-	-	-	-

根据系统结构与相应参数，基于 CloudPSS 云仿真平台搭建电磁暂态仿真模型，并进行不同工况下系统暂态仿真分析研究，CloudPSS 模型如图 3 所示。

根据 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》，当三相系统最高电压为 U_m 时，操作过电压的基准，即 1.0(pu) 应为 $\sqrt{2}U_m/\sqrt{3}$ ；对于 220 kV 电压等级的电力系统， U_m 为 252 kV，则操作过电压的基准值为

$$1.0 \text{ (pu)} = \frac{\sqrt{2}U_m}{\sqrt{3}} = 205.8 \text{ kV}$$

(1)

2 不同短路容量下海缆操作过电压分析

在电力系统分析计算中，短路容量常作为一个重要的参数表征电力系统供电能力的强弱，也是评估电力系统性能的重要指标之一。短路容量的大小等于短路电流与短路处的额定电压的乘积，即

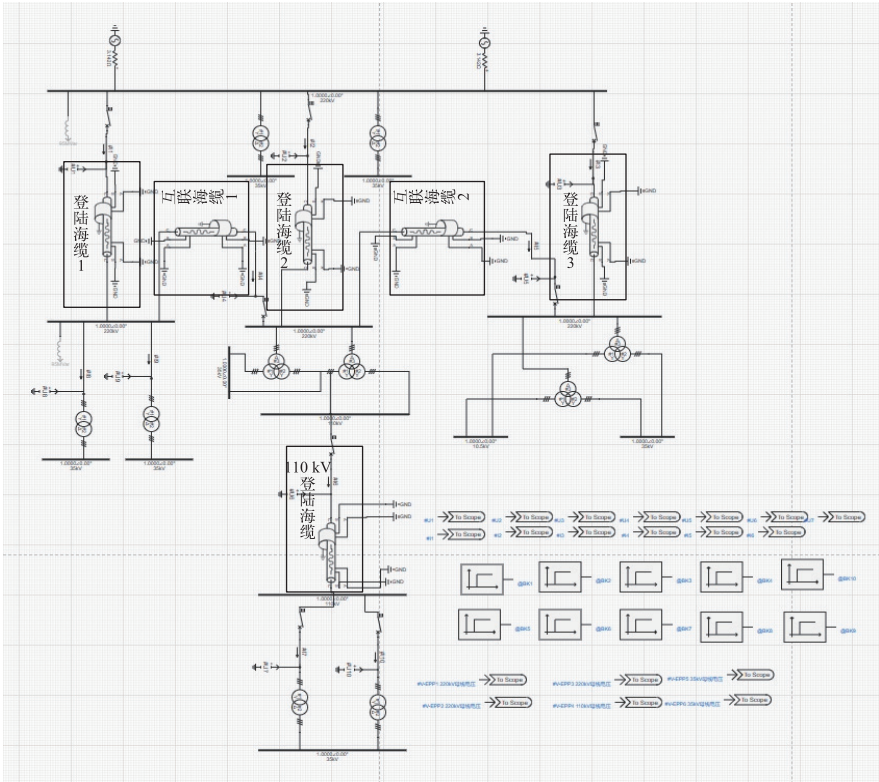


图 3 系统电磁暂态仿真模型
Fig. 3 System electromagnetic transient simulation model

$$S_k = I_k^{(3)} U_{av} \quad (2)$$

式中, S_k 为电力系统短路容量; $I_k^{(3)}$ 为短路点三相短路时的短路电流; U_{av} 为系统的平均额定电压。

计算式为

$$I_k^{(3)} = U_{av} / \sqrt{3} Z_{k\Sigma} \quad (3)$$

式中, $Z_{k\Sigma}$ 为系统总阻抗。故系统的短路容量主要由系统的等效阻抗决定, 且系统的短路容量越大, 对应的等效阻抗越小。

下面以220 kV登陆海底电缆1为分析对象, 通过改变系统等效阻抗, 研究系统在不同短路容量下的操作过电压, 找出系统操作过电压的影响因素。

(1) 工况1: 系统等效阻抗为0.1 Ω

此工况下, 登陆海缆1下级母线220 kV EPP1空载, 其余参数不变, 登陆海缆1送端开关在0.5 s时合闸, 即将登陆海缆1在0.5 s时投入, 校验海缆在等效阻抗为0.1 Ω 时的空载合闸过电压, CloudPSS仿真结果如图4所示。

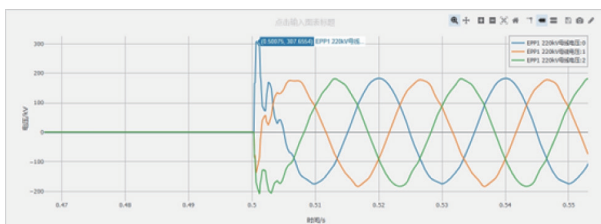


图4 等效阻抗为0.1 Ω 时海缆操作过电压

Fig. 4 Submarine cable operation overvoltage when equivalent impedance is 0.1 Ω

海缆1在合闸一瞬间有过电压产生, 其值约为307.7 kV, 过电压倍数约为1.5 (pu)。

(2) 工况2: 系统等效阻抗为1 Ω

此工况下, 同样将登陆海缆1下级母线220 kV EPP1空载, 其余参数不变, 登陆海缆1送端开关在0.5 s时合闸, 即将登陆海缆1在0.5 s时投入, 校验海缆在等效阻抗为1 Ω 时的空载合闸过电压, CloudPSS仿真结果如图5所示。

海缆1在合闸一瞬间有过电压产生, 其值约为304.8 kV, 过电压倍数约为1.48 (pu)。

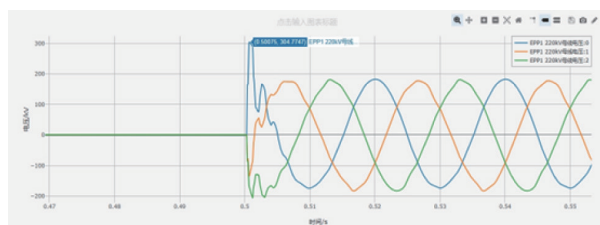


图5 等效阻抗为1 Ω 时海缆操作过电压

Fig. 5 Submarine cable operation overvoltage when equivalent impedance is 1 Ω

(3) 工况3: 系统等效阻抗为10 Ω

此工况下, 同样将登陆海缆1下级母线220 kV EPP1空载, 其余参数不变, 登陆海缆1送端开关在0.5 s时合闸, 即将登陆海缆1在0.5 s时投入, 校验海缆在等效阻抗为10 Ω 时的空载合闸过电压, CloudPSS仿真结果如图6所示。

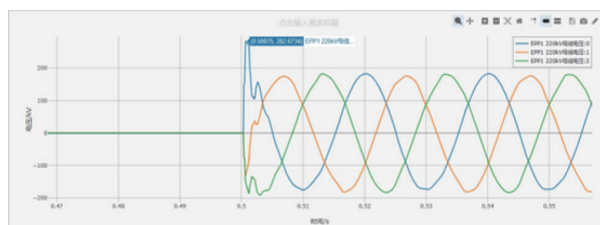


图6 等效阻抗为10 Ω 时海缆操作过电压

Fig. 6 Submarine cable operation overvoltage when equivalent impedance is 10 Ω

海缆1在合闸一瞬间有过电压产生, 其值约为282.7 kV, 过电压倍数约为1.37 (pu)。

(4) 工况4: 系统等效阻抗为50 Ω

此工况下, 同样将登陆海缆1下级母线220 kV EPP1空载, 其余参数不变, 登陆海缆1送端开关在0.5 s时合闸, 即将登陆海缆1在0.5 s时投入, 校验海缆在等效阻抗为50 Ω 时的空载合闸过电压, CloudPSS仿真结果如图7所示。

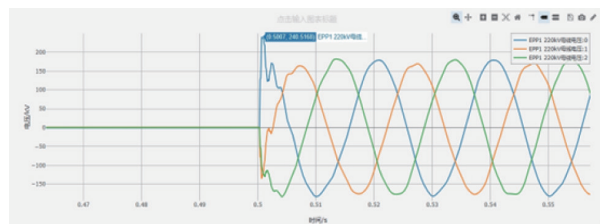


图7 等效阻抗为50 Ω 时海缆操作过电压

Fig. 7 Submarine cable operation overvoltage when equivalent impedance is 50 Ω

海缆1在合闸一瞬间有过电压产生，其值约为240.5 kV，过电压倍数约为1.17（pu）。

不同短路容量海缆操作过电压见表3。

表 3 不同短路容量海缆操作过电压
Tab. 3 Operational overvoltage of submarine cables with different short-circuit capacities

等效阻抗 /Ω	过电压 /kV	过电压倍数（pu）
0.1	307.7	1.5
1	304.8	1.48
10	282.7	1.37
50	240.5	1.17

综上所述，随着系统短路容量降低，海缆的操作过电压也随之降低。这是因为过电压是由工频过电压分量与自振过电压分量组成的。随着系统短路容量降低，电容效应引起的工频分量升高，同时首次自振角频率 ω 降低，导致自振分量过晚出现最大值，引起自振过电压分量降低，从而导致过电压降低。

3 并联电抗器对操作过电压抑制能力分析

通过上述分析可知，短路容量对于操作过电压的影响较为显著，为了分析并联电抗器对操作过电压的抑制能力，分别选取首末端不投入、首端投入和末端投入电抗器三种情况进行分析说明。

(1) 工况1：首末端不投入电抗器

此工况下，首末端均不投入并联电抗器，其余参数不变，同样将下级母线220 kV EPP1空载，校验登陆海缆1空合闸操作过电压，CloudPSS仿真结果如图8所示。

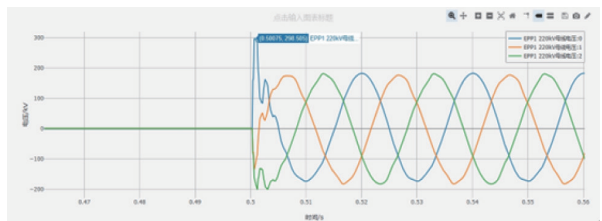


图 8 首末端不加电抗器时海缆操作过电压
Fig. 8 Operation overvoltage of submarine cable without reactor at head and end

从图8可以看出，当首末端均不加电抗器时，海缆在投入一瞬间有较大的过电压，其值约为298.5 kV，过电压倍数约为1.45（pu）。

(2) 工况2：首端投入电抗器

此工况下，首端投入并联电抗器，其余参数不变，同样将下级母线220 kV EPP1空载，校验登陆海缆1空合闸操作过电压，CloudPSS仿真结果如图9所示。

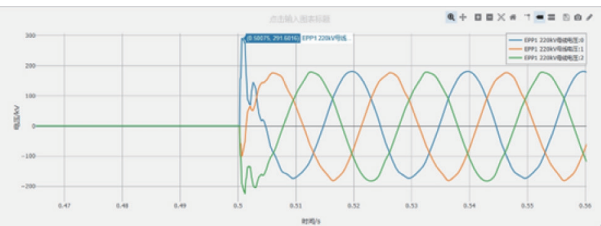


图 9 首端加并联电抗器时海缆操作过电压
Fig. 9 Operation overvoltage of submarine cable when reactor at head

从图9可以看出，首端投入并联电抗器后，在海缆投入瞬间操作过电压较前种工况有所降低，但是抑制效果不明显，其过电压约为291.6 kV，过电压倍数约为1.42（pu）。

(3) 工况3：末端投入电抗器

此工况下，末端投入并联电抗器，其余参数不变，同样将下级母线220 kV EPP1空载，校验登陆海缆1空合闸操作过电压，CloudPSS仿真结果如图10所示。

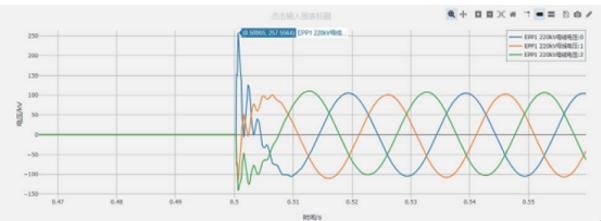


图 10 末端加并联电抗器时海缆操作过电压
Fig. 10 Operation overvoltage of submarine cable when reactor at end

从图10可以看出，末端加入并联电抗器后，海缆在投入瞬间的操作过电压较其他两种工况大幅降低，其过电压约为257.6 kV，过电压倍数约为1.25（pu）。

不同电抗器位置下海缆操作过电压见表4。综上所述,并联电抗器对于海缆操作过电压有一定抑制作用,但是在不同位置抑制效果明显不同,由于海缆在末端情况下操作过电压最为严重,故在末端设置并联电抗器抑制海缆操作过电压效果最为显著。

表4 不同电抗器位置下海缆操作过电压
Tab. 4 Operational overvoltage of submarine cables with different reactor positions

电感器位置	过电压/kV	过电压倍数 (pu)
首末端均不投入	298.5	1.45
首端投入	291.6	1.42
末端投入	257.6	1.25

4 结束语

本文以渤海海域某海洋石油平台为研究对象,在CloudPSS云平台上建立系统电磁暂态仿真模型,计算不同短路容量下220 kV海缆的操作过电压,进而研究并联电抗器对于海缆过电压的抑制能力,通过分析得出以下结论。

1) 当系统短路容量不同时,随着系统短路容量降低,自振过电压分量也降低,导致海缆的过电压也随之降低。

2) 并联电抗器对于海缆操作过电压有一定的抑制作用,且电抗器在海缆末端布置时抑制效果最为显著。

220 kV海缆操作过电压的电磁暂态仿真研究,为海上平台安全性供电连续性与可靠性提供了坚实的保障,同时为海洋系统设备选型与参数

设置提供了理论依据。

参考文献

- [1] 徐丹铮, 缪燕华, 吴斐文. 大功率电力系统船舶的电气设计(上)[J]. 船舶, 2009, 12(5): 30.
- [2] 徐丹铮, 缪燕华, 吴斐文. 大功率电力系统船舶的电气设计(下)[J]. 船舶, 2009, 12(6): 46-49.
- [3] 何发武, 邓婧, 卢赓. 基于ATP-EMTP的海上风电送出海缆工频过电压仿真分析[J]. 电工电气, 2024(6): 35-39.
- [4] 王艳红. 基于MATLAB的长距离海缆合闸过电压仿真研究[J]. 电工技术, 2020(6): 65-67.
- [5] 徐红梅. 海上电力组网用海底电缆操作过电压机理分析及抑制措施[J]. 石化技术, 2018, 25(8): 171-172.
- [6] 李浩原, 周国梁, 王刚, 等. 海上风电柔性直流送出海缆过电压研究[J]. 南方电网技术, 2021, 15(11): 56-61.

作者简介

陈翰博(1998—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为海洋石油及天然气开发工程中电气设计。

刘树慰(1970—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为海洋石油及天然气开发工程中电气设计。

张恒旭(1994—), 男, 工程师, 研究方向为海洋石油及天然气开发工程中电气设计。

(收稿日期: 2024-07-22)