

Study on cable selection calculation of 35kV collector line for energy storage power station

Lihui Dong¹ Feng Huang¹ Xinghuan Xia²

1. Zhejiang Nengjian Weiye Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

2. East China Survey and Design Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract

In the context of global energy transition, with the large-scale development and utilization of renewable energy sources such as solar and wind power, the importance of energy storage stations as a critical component in power systems is becoming increasingly prominent. The stable operation of energy storage stations relies on the coordinated efforts of all its components. Among these, the 35kV cable collection line serves as a vital link between energy storage devices and the grid, playing a crucial role in power transmission. The selection and calculation of 35kV cable collection lines are of great significance for the stable operation and cost control of energy storage stations. This paper addresses the issues of complex load characteristics and insufficient adaptability of traditional selection methods in the selection of 35kV cable collection lines for energy storage stations. Combining practical engineering needs, the study conducts calculations and research from multiple dimensions including current-carrying capacity, voltage drop, short-circuit thermal stability, economic efficiency, and environmental adaptability. Through case analysis, the effectiveness of the calculation methods is verified, providing a scientific and accurate theoretical basis and practical guidance for the selection of 35kV cable collection lines in energy storage stations.

Keywords

energy storage power station, cable, calculation, current carrying capacity, voltage drop, cross-sectional area

关于储能电站 35kV集电线路电缆选型计算和研究

董立辉¹ 黄峰¹ 夏兴焕²

1. 浙江能建伟业工程咨询有限公司, 中国·浙江 杭州 310000

2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 中国·浙江 杭州 310000

摘要

在全球能源转型的大背景下,随着可再生能源如太阳能、风能的大规模开发利用,储能电站作为电力系统中的关键环节,其重要性日益凸显。储能电站的稳定运行离不开各个组成部分的协同配合,其中35kV电缆集电线路作为连接储能设备与电网的重要纽带,承担着电能传输的关键任务。35kV集电线路电缆的选型计算对储能电站的稳定运行、成本控制意义重大。本文针对储能电站35kV集电线路电缆选型中存在的负荷特性复杂、传统选型方法适应性不足的问题,结合工程实际需求,从载流量、电压降、短路热稳定性、经济性及环境适应性等多维度展开计算和研究。通过实际案例分析验证计算方法的有效性,为储能电站35kV集电线路电缆选型提供科学、准确的理论依据与实践指导。

关键词

储能电站; 电缆; 计算; 载流量; 电压降; 截面积

1 引言

随着储能技术在电力系统中的广泛应用,储能电站的建设规模与数量不断增加,储能电站在电力系统中承担着削峰填谷、提升电能质量、保障电力稳定供应的关键角色,其重要性日益凸显。35kV 电缆集电线路作为储能电站内部电能传输的关键环节,承担着将各个储能单元的电能汇集并输送至升压站的重要任务。合理的电缆集电线路选型不仅能够

确保电能高效、稳定传输,还能降低线路损耗和建设成本,对储能电站的安全经济运行至关重要。因此,深入研究储能电站 35kV 电缆集电线路的选型计算方法具有重要的现实意义。

2 储能电站 35kV 电缆集电线路概述

2.1 电缆集电线路的功能与构成

储能电站 35kV 集电线路的主要功能是实现储能单元与升压站之间的电气连接,将分散的储能电能进行集中传输。其基本构成包括电缆本体、电缆终端头、中间接头、电缆支架、电缆保护管以及接地系统等。电缆本体负责电能传导,

【作者简介】董立辉(1982-),男,中国江苏宿迁人,本科,高级工程师,从事新能源工程设计和研究。

终端头用于连接电缆与设备，中接头用于连接不同长度的电缆，电缆支架提供支撑，电缆保护管保护电缆免受外力损伤，接地系统则保障线路的安全运行。

2.2 电缆类型与敷设方式

常见的35kV电缆类型有交联聚乙烯绝缘电缆(XLPE)、油纸绝缘电缆等，其中交联聚乙烯绝缘电缆因其良好的电气性能、机械性能和耐热性能，在储能电站中应用广泛。电缆的敷设方式主要有直埋敷设、电缆沟敷设、桥架敷设和排管敷设等。直埋敷设施工简单、成本较低，但电缆维护和检修难度较大；电缆沟敷设便于电缆维护和检修，但占用空间较大；桥架敷设适用于室内或电缆数量较多的场所，具有安装方便、美观等优点；排管敷设则能有效保护电缆，适用于穿越道路、建筑物等特殊地段。

3 储能电站 35kV 电缆选型的重要性

3.1 保障电能传输效率

高效的电能传输是储能电站实现其功能的基础。35kV电缆负责将储能单元产生的电能汇集并传输至升压站或负载端，若电缆选型不当，如电缆截面积过小，会导致电阻增大，根据焦耳定律 $Q = I^2Rt$ ，电流通过电缆时产生的热量增多，电能损耗增大，降低了电能传输效率，影响储能电站的经济效益^[1]。

3.2 确保运行安全可靠

安全可靠的运行是储能电站持续稳定工作的前提。合理选型的35kV电缆能够承受正常运行时的电流以及短路故障时的短时大电流冲击，具备良好的绝缘性能和热稳定性，有效避免因电缆故障引发的火灾、爆炸等安全事故，保障储能电站工作人员和设备的安全^[2]。

3.3 控制建设与运维成本

电缆的选型不仅涉及初始采购成本，还与长期的运维成本密切相关。选择性能优良、规格合适的35kV电缆，虽然可能在初期投资较高，但能够减少后期因电缆故障导致的维修、更换费用，同时降低电能损耗带来的成本增加，从全生命周期角度实现成本的有效控制。

4 电缆选型计算的关键参数及方法

4.1 载流量计算

载流量是指电缆在允许的发热条件下，能够连续输送的最大电流值。在选型时，需确保电缆的载流量大于集电线路的最大工作电流。影响35kV电缆载流量的因素众多，主要包括电缆导体材料（如铜、铝）、导体截面积、绝缘材料及厚度、电缆敷设方式（直埋、电缆沟、桥架等）以及环境温度等^[3]。

对于35kV交联聚乙烯绝缘电缆，可根据《电力工程设计手册·电气一次部分》第十七章，电缆载流量计算公式如下

$$K \times I_e \geq I_g, \text{ 其中 } K = K_t \times K_l, \text{ 其中:}$$

I_e - 电缆额定载流量（单位：安培，A）；；

I_g - 回路工作电流（单位：安培，A）；；

K - 电缆敷设系数；

K_t - 环境温度校正系数；

K_l - 空气中并列敷设电缆的校正系数；

在实际工程中， I_e 可直接查阅电缆厂家提供的载流量数据表，但需注意表中数据的适用条件，并根据实际情况进行修正。

4.2 电压降计算

电缆在输送电能过程中会产生电压损失，若电压损失过大，会导致储能单元端电压过低，影响其充放电效率和使用寿命。因此，需要控制电缆的电压损失在允许范围内。电压损失与电缆的电阻、电抗、电流大小以及功率因数等因素有关。在储能电站中，过大的电压降会影响储能设备的正常运行以及电能质量。35kV电缆的电压降可按下式计算：

$$\Delta U = I \times R \times L, \text{ 其中:}$$

ΔU - 表示电压降（单位：伏特，V）；

I - 通过电缆的电流（单位：安培，A）；

R - 是电缆每单位长度的电阻（单位：欧姆/米， Ω/m ）；

L - 是电缆的长度（单位：米，m）

一般要求35kV电缆的电压降不超过额定电压的5%，以确保储能电站内设备的正常运行。

4.3 短路热稳定计算

在短路故障发生时，电缆会承受短时大电流的冲击，产生大量热量。其热效应会对电缆造成极大的危害。短路电流产生的热量 $Q = I^2t$ （其中 I 为短路电流， t 为短路持续时间），在短时间内会使电缆温度迅速升高。如果电缆不能承受这种高温，其绝缘材料会发生热降解、融化等现象，导致绝缘性能丧失，引发电缆故障。为保证电缆在短路情况下不致因过热而损坏，需要进行短路热稳定计算。根据《GB 50217-2018 电力工程电缆设计规范》附录 E 计算公式如下：

$$S = \frac{\sqrt{Q}}{C} \quad (\text{其中 } Q = I_c^2 t), \quad C = \frac{1}{\eta} \times \sqrt{\frac{J_q}{\alpha K \rho} \ln \frac{1 + \alpha(\theta_m - 20)}{1 + \alpha(\theta_p - 20)}}$$

其中， $\theta_p = \theta_o + (\theta_H - \theta_o) \left(\frac{t}{t_H}\right)^2$ ，本工程按 $\theta_p = \theta_H$ ；

S - 电缆导体界面（ mm^2 ）；

Q - 短路热效应（ $kA^2 \cdot s$ ）；

I_c - 短路电流；

t - 主保护动作时间加断路器全分闸时间（s）；

J - 热功当量系数；

q - 电缆导体的单位体积热容量 [$J / (cm^3 \cdot ^\circ C)$]；

η - 计入包含电缆导体充填物热容影响的校正系数；

α - 20 $^\circ C$ 时电缆导体的电阻温度系数（ $1/^\circ C$ ）；

ρ - 20 $^\circ C$ 时电缆导体的电阻系数（ $\Omega cm^2/cm$ ）；

θ_m - 短路作用时间内电缆导体允许最高温度（ $^\circ C$ ）；

θ_p - 短路发生前的电缆导体最高工作温度（ $^\circ C$ ）；

电缆导体的交流电阻与直流电阻之比值。

5 实际案例计算分析

5.1 工程背景

某储能电站规划设计装机容量为 100MW/200MWh，每个储能单元采用 1 台 5MW 交流升压站一体机和 2 台

5.015MWh 电池舱，共分 4 回集电线路，每回集电线路由 5 个储能单元，通过“手拉手”方式，接入升压站 35kV 母线侧。电缆敷设方式为采用电缆沟支架敷设，该工程所在地环境温度常年平均值为 25℃，本工程升压站 35kV 母线侧的最大短路电流为 16.5kA，短路持续时间为 0.5s。单个集电线路电气接线原理图，如图 1 所示：

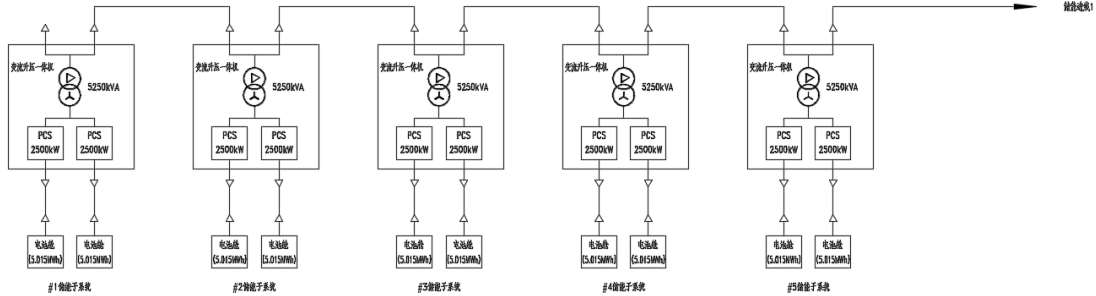


图 1 单个集电线路电气接线原理图

5.2 选型计算过程

5.2.1 载流量计算

根据本工程需求，集电线路电缆选用铜芯 YJV（交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电力电缆），查询某电缆厂家的电缆载流量样本，如表 1 所示：

表 1 某电缆厂家的电缆载流量

| 电缆型号 | 电缆载流量 I _e |
|---|----------------------|
| ZC-YJV22-26/35kV-3 × 95mm ² | 285A |
| ZC-YJV22-26/35kV-3 × 150mm ² | 320A |
| ZC-YJV22-26/35kV-3 × 240mm ² | 437A |
| ZC-YJV22-26/35kV-3 × 300mm ² | 500A |

每个储能单元输出功率为 5MW，单个储能单元的回路工作电流计算公式为

$$I_g = \frac{S_e}{\sqrt{3}U_e} = \frac{5MW}{\sqrt{3} \times 35kV} \approx 82.5A$$

本工程单回集电线路由 5 个储能单元组成，根据此公式计算并联不同数量的储能单元回路，得到集电线路的回路工作电流，如表 2 所示：

表 2 不同数量的储能单元回路工作电流

| 电压 | 并联储能单元数量 | 回路工作电流 |
|------|----------|--------|
| 35kV | 1 | 82.5 A |
| 35kV | 2 | 165.0A |
| 35kV | 3 | 247.4A |
| 35kV | 4 | 329.9A |
| 35kV | 5 | 412.4A |

现根据 $K \times I_e \geq I_g$ ，其中 $K = K_t \times K_l$ 计算电缆敷设系数，如下：

K_t - 环境温度校正系数，本工程按 45℃取值为 0.94；

K_l -空气中并列敷设电缆的校正系数，按照 2 根并列考虑，取值为 0.9；

K_t 和 K_l 敷设系数根据《电力设计手册·火力发电厂电气一次设计》第十六章，敷设系数查询如下：

表 16-10 35kV 及以下电缆在不同环境温度时的载流量校正系数

| 导体工作温度 (°C) | 空气中 | | | | 土壤中 | | | |
|-------------|------|------|-----|------|------|-----|------|------|
| | 30 | 35 | 40 | 45 | 20 | 25 | 30 | 35 |
| 60 | 1.22 | 1.11 | 1.0 | 0.86 | 1.07 | 1.0 | 0.93 | 0.85 |
| 65 | 1.18 | 1.09 | 1.0 | 0.89 | 1.06 | 1.0 | 0.94 | 0.87 |
| 70 | 1.15 | 1.08 | 1.0 | 0.91 | 1.05 | 1.0 | 0.94 | 0.88 |
| 80 | 1.11 | 1.06 | 1.0 | 0.93 | 1.04 | 1.0 | 0.95 | 0.90 |
| 90 | 1.09 | 1.05 | 1.0 | 0.94 | 1.04 | 1.0 | 0.96 | 0.92 |

表 16-11 电线电缆在空气中多根并列敷设时载流量的校正系数

| 线缆根数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 4 | 6 | |
|--------|---------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| 排列方式 | ○ | ○ ○ | ○ ○ ○ | ○ ○ ○ ○ | ○ ○ ○ ○ ○ ○ | ○ ○ ○ ○ | ○ ○ ○ ○ ○ ○ | |
| 线缆中心距离 | $S=d$ $S=2d$ $S=3d$ | 1.0 0.9 1.0 | 1.0 1.0 1.0 | 0.85 0.98 1.0 | 0.82 0.95 0.98 | 0.80 0.90 0.96 | 0.8 0.9 1.0 | 0.75 0.90 0.96 |

注 本表系产品外径相同时的载流量校正系数，d 为电缆的外径。当电线电缆外径不同时，d 值建议取各产品外径的平均值。

根据查询的结果,将校正系数带入计算公式: $K \times I_e = Kt \times Kl \times I_e = 0.94 \times 0.9 \times I_e$,并联不同数量的储能单元回路计算结果分别,如表3所示:

表3 集电线路电缆选型结果对比

| 电压 | 并联储能单元数量 | 回路工作电流 | 电缆选择型号 | 修正后电缆载流量 | 选型结果 |
|------|----------|--------|---------------------------------------|----------|------|
| 35kV | 1 | 82.5 A | ZC-YJV22-26/35kV-3×95mm ² | 225.5A | 合格 |
| 35kV | 2 | 165.0A | ZC-YJV22-26/35kV-3×95mm ² | 225.5A | 合格 |
| 35kV | 3 | 247.4A | ZC-YJV22-26/35kV-3×150mm ² | 279.7A | 合格 |
| 35kV | 4 | 329.9A | ZC-YJV22-26/35kV-3×240mm ² | 382.0A | 合格 |
| 35kV | 5 | 412.4A | ZC-YJV22-26/35kV-3×300mm ² | 437.1A | 合格 |

5.2.2 电压降计算

本工程最长1根电缆是接入升压站的ZC-YJV22-26/35kV-3×300mm²,长度为0.5km,已知所选电缆的单位长度电阻R=0.063Ω/km,通过电缆的工作电流I=412.4A,代入电压降计算公式可得:

$$\Delta U = I \times R \times L = 412.4A \times 0.063\Omega/km \times 0.5km = 13V$$

35kV电缆额定电压为35000V,所以,该回路的电缆电压降计算公式为: $\frac{13V}{35000V} \times 100\% = 0.04\%$,小于5%,满足电压降要求。

5.2.3 短路热稳定计算

对于铜芯电缆,根据本文第3.3章节的短路热稳定计算公式及相关取值系数如下:

I_c -短路电流,本工程取值为16.5kA;

t-主保护动作时间加断路器全分闸时间(s),取值为0.5;

J-热功当量系数,取值为1.0;

q-电缆导体的单位体积热容量[J/(cm³·°C)],铜芯取3.4;

η -计入包含电缆导体充填物热容影响的校正系数,按 $\eta=1$;

α -20°C时电缆导体的电阻温度系数(1/°C),铜芯取值为0.00393;

ρ -20°C时电缆导体的电阻系数(Ωcm²/cm),铜芯取值为0.01724×10⁻⁴;

θ_m -短路作用时间内电缆导体允许最高温度(°C),

取值为250;

θ_p -短路发生前的电缆导体最高工作温度(°C),取值为90;

将以上数值带入公式

$$S = \frac{\sqrt{Q}}{C} \quad (\text{其中 } Q = I_c^2 t), \quad C = \frac{1}{\eta} \times \sqrt{\frac{Jq \ln \frac{1+\alpha(\theta_m-20)}{1+\alpha(\theta_p-20)}}{\alpha k \rho}}$$

最终计算出S≈86.08mm²,工程使用最小电缆截面截面积为3×95mm²,算所需的最小截面积,满足短路热稳定要求。

5.3 结果分析

通过对载流量、电压降和短路热稳定的计算分析,最终确定表3的电缆选型为该储能电站35kV集电线路的合适选型。在实际运行中,该电缆能够满足储能电站正常运行时的载流需求,确保电压降在合理范围内,同时具备足够的短路热稳定性能,保障了储能电站的安全可靠运行。此外,通过对不同电缆规格的计算和比较,也可以看出在电缆选型过程中,各项参数之间相互关联,需要综合考虑,以达到最佳的选型效果。

6 结论

储能电站35kV集电线路选型计算是一个涉及多因素、多环节的复杂过程。通过准确的负荷计算、严格的电压降校验、科学的短路电流计算以及合理的经济电流密度选择导线截面等步骤,能够确定满足储能电站运行要求且经济合理的集电线路方案。案例分析结果表明,本文提出的选型计算方法具有较高的实用性和可靠性,可为储能电站集电线路设计提供有力的技术支持。在未来的储能电站建设中,随着技术的不断发展和应用需求的变化,集电线路选型计算方法还需进一步优化和完善,以适应不同类型储能电站的建设需求^[4-6]。

参考文献

- [1] 党天刚,陈庆文.大型光伏电站场区35 kV电缆选型及设计实践[J].太阳能,2024(11):100-105.
- [2] 李小明.城市轨道交通35kV电力电缆载流量研究[J].电气开关,2022(001):060.
- [3] GB 50217-2018电力工程电缆设计规范.
- [4] 中国电力工程顾问集团有限公司,电力设计手册.火力发电厂电气一次设计,2018-03.
- [5] 水利电力部西北电力设计院,电力工程电气设计手册.电气一次部分,1989-12.
- [6] 特变电工山东鲁能素山电缆有限公司,中低压电力电缆及特种电缆样本册.