电解铝直流接入侧立体布置平台母线短路动稳定分析

裘 啸 张国付

上海发电设备成套设计研究院有限责任公司 上海 200000

【摘 要】：针对电解铝主母线附近场地受限的大容量多机直流接入需求，以 6 台 17 MW 降压直流设备的三层平台为对象，建立硬铝母线短路电动力—支撑跨弯曲模型。按新能源侧单独馈入和多源共同馈入设置 315.4、7571 kA 两级冲击峰值，计算电动力、允许跨距、母线应力和绝热温升。结果表明：315.4 kA 下电动力为 13.264 kN/m；绝缘子弯曲破坏力矩为 5 kN·m、安全系数为 2.0 时，允许跨距为 1.228 m。母线屈服弯矩不是竖直段控制条件，而是由绝缘子及其连接金具决定。在反送隔离和支撑条件落实后，三层布置方案原则可行。

【关键词】：电解铝；降压直流设备；立体布置；硬铝母线；短路电动力

DOI:10.12417/2705-0998.26.14.007

引言

为消纳风电等新能源并推动电解铝生产低碳转型，可通过直流汇集和降压接入将新能源电力引入既有电解铝直流主母线。接入点紧邻在运工艺设施，设备布置受绝缘、检修和既有构筑物限制，平面扩展空间有限。多层钢结构平台能够提高布置密度并兼顾分层引出和集中检修，但其竖直分支较长，短路电动力经绝缘子、金具传至平台梁，仅按总高度布置固定点难以判断支撑能力。因此，立体布置的工程需求与短路支撑约束之间存在矛盾，需要建立故障电流与结构支撑的定量关系。

直流短路研究已揭示电流上升、峰值及焦耳积分对动热稳定校核的影响[1-2]，IEC 61660-2 给出了直流辅助装置刚性导体短路效应的通用计算方法[3]，母线支撑参数也可按挠度约束优化[4]。但多机三层布置仍需联合分析故障位置、馈入路径与支撑体系，确定竖直段支撑数量及水平汇流段校核边界。本文以 6 台 17MW 降压直流设备三层布置为对象，设置两类冲击边界和分支等电流分配敏感性工况，建立电动力—支撑跨弯曲—绝热温升模型，比较 11 m 竖直段支撑方案，并校核母线应力、热效应及水平汇流段受力。

1 工程对象与计算边界

1.1 三层布置与母线参数

研究对象为新能源经降压直流设备接入电解铝主母线的区域，平台距主母线约 30 m。三层平台地面层、第二层和第三层标高分别为 0、5.5 和 11 m，每层布置 2 台 17 MW 降压直流设备。各台设备正负极经分支母线引出，在平台外侧形成竖直段，于底层汇流后接入主母线。底部软连接用于安装和位移补偿，不计入抗弯约束。

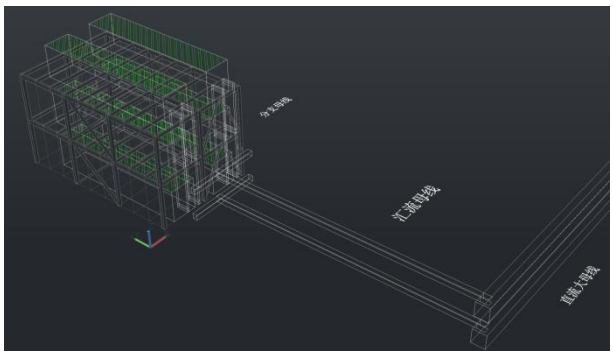

图 1 三层钢结构平台及母线引出示意

表 1 布置与母线主要参数

参数	数值或规格	参数	数值或规格
单台容量与数量	17 MW×6 台	总容量	102 MW
最高竖直段高度	约 11 m	层间净高	5.5 m
分支母线截面	700 mm×600 mm	截面积 A	0.42 m²
正负极中心间距 a	1.5 m	截面模量 W	0.049 m³
铝材密度ρm	2700 kg/m³	弹性模量 E	70 GPa
铝材电阻率ρe	2.8×10⁻⁸Ω·m	比热容 c	900 J/(kg·K)
计算屈服强度σy	80 MPa	结构安全系数 K	2.0
绝缘子弯曲破坏力矩 Mb	5 或 20 kN·m	动态系数φd	1.0 或 1.5

计算按连续实心均匀截面处理；组合或焊接截面应重新确定截面模量并校核连接强度。多母线对耦合、截面形状和拐角电流集中暂不计入。

1.2 短路工况

短路电流按故障位置和馈入路径条件。图 2 中 D2 位于防反二极管汇流侧，需考虑整流机组和其他降压设备共同馈入；D3 位于二极管的设备侧，反送路径阻断后按新能源侧单独馈入分析。由此形成两级故障边界，并增设分支等电流分配敏感

性工况，见表 2。

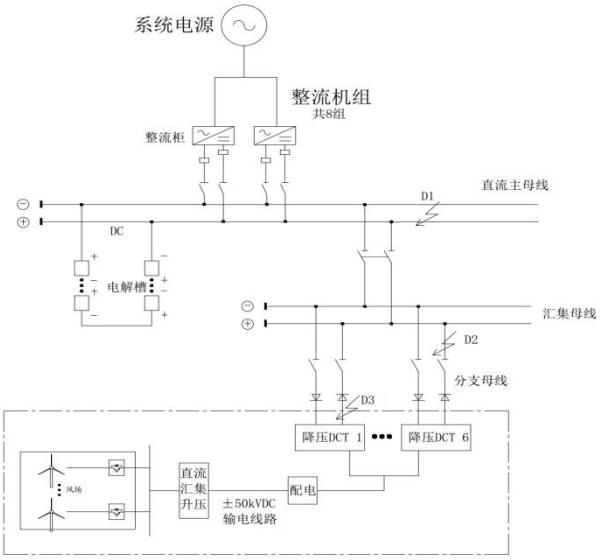

图 2 直流接入大母线及故障点示意

表 2 竖直分支母线短路计算工况

工况	故障与电流边界	冲击电流/kA	分析用途
工况一	整流侧反送可靠隔离，仅计新能源侧贡献	315.4	分支支撑设计边界
工况二	315.4 kA 由 4 条竖直分支等电流分配	78.9	分配敏感性分析
工况三	D2 等二极管汇流侧故障，多源贡献叠加	7571	极端边界分析

工况二为四分支等电流假设，78.9 kA，用于比较电流分配对跨距的影响，不代表实际故障分配；工况三由新能源侧 315.4 kA 与整流侧 7256 kA 叠加。各工况取冲击电流进行等效静态计算，工况一按 50 ms 估算绝热温升。

2 短路力学与热效应模型

2.1 电动力

平行正负极导体电流方向相反时产生排斥力。单位长度电动力为[3]

$$f=\frac{\mu_0}{2\pi}\frac{i_1 i_2}{a}K_s \qquad (1)$$

式中：μ0 为真空磁导率；i1、i2 为导体瞬时电流；a 为中心间距；Ks 为矩形截面及邻近效应修正系数[5]。方案阶段取 Ks=1，且 i1=i2=I，得

$$f\approx 2\times 10^{-7}\frac{I^2}{a} \qquad (2)$$

直流故障电动力方向不变，幅值满足 $f(t)\propto i^2(t)$。式（2）以冲击峰值进行等效静态计算，并将跨内电磁力简化为均布荷载。Ks=1 为方案假定，端部、弯角及多层导体邻近区域仍需局部电磁场校核。

2.2 支撑跨弯曲

将单跨竖直母线近似为两端简支梁，短路电动力按均布荷载处理[3]，则

$$M_{max}=\frac{fd^2}{8} \qquad (3)$$

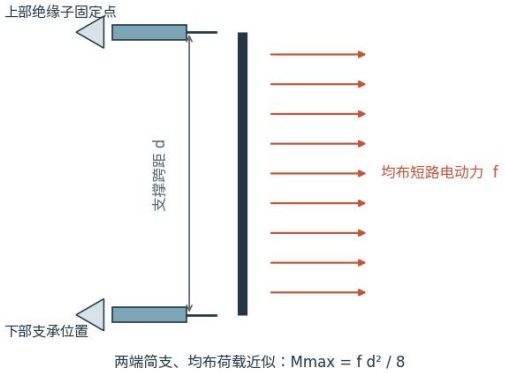

图 3 竖直硬铝母线支撑跨力学简化模型

设绝缘子弯曲破坏力矩为 Mb、安全系数为 K、动态系数为φd，允许跨距为

$$d_{allow}=\sqrt{\frac{8M_b}{K\phi_d f}} \qquad (4)$$

总高度为 H 时，支撑跨数 N=ceil(H/dallow)，等跨后的实际跨距为 H/N。母线弯曲应力为σ=Mmax/W，屈服弯矩为 My=Wσy。动态系数取 1.5 作敏感性分析。

2.3 绝热温升

短路旁路散热时，导体绝热温升为[2-3]

$$\Delta T=\frac{\rho_e J}{\rho_m c A^2},\qquad J=\int_0^{t_k} i^2(t)\,dt \qquad (5)$$

式中：ρe、ρm、c 和 A 分别为电阻率、密度、比热容和截面积。短路持续时间短，忽略散热，以焦耳积分表征热作用。热效应采用 315.4 kA 持续 50 ms 的矩形计算边界，即 $J=I_p^2 t_k$，仅对应工况一；实际工程应按完整电流波形计算。

3 计算结果

3.1 电动力与允许跨距

表 3 不同工况下的电动力与支撑允许跨距

工况	工况一	工况二	工况三
电动力 f	13.264 kN/m	0.830 kN/m	7.643 MN/m

Mb=5 kN·m，φd=1	1.228 m	4.909 m	0.0512 m
Mb=5 kN·m，φd=1.5	1.003 m	4.008 m	0.0418 m
Mb=20 kN·m，φd=1	2.456 m	9.817 m	0.1023 m
Mb=20 kN·m，φd=1.5	2.005 m	8.016 m	0.0835 m

注：表中跨距均取 K=2。

电动力与电流平方成正比，允许跨距与电流近似成反比。工况一不能采用 5.5 m 层间单点固定；工况二采用 5 kN·m 绝缘子时允许跨距为 4.008～4.909 m，仍不能仅以层间单点固定；工况三允许跨距仅为厘米级，应通过故障隔离、逆止保护和限流控制。工况一支撑方案不覆盖工况三。

3.2 竖直段支撑方案

表 4 11 m 竖直母线支撑方案（工况一，K=2）

方案	A：常规、静态	B：高强、静态	C：常规、动力	D：高强、动力
Mb/(kN·m)	5	20	5	20
φd	1.0	1.0	1.5	1.5
允许跨距上限/m	1.200（由 1.228 圆整）	2.456	1.003	2.005
最少跨数	10	5	11	6
等跨后跨距/m	1.100	2.200	1.000	1.833
支承位置构成	9 中间+2 端部	4 中间+2 端部	10 中间+2 端部	5 中间+2 端部

动力效应未明确前宜采用方案 C；需减少固定点时可采用方案 D，并同步校核金具和平台主梁。前者以较小跨距降低绝缘子弯矩，后者以较高支撑强度减少固定点，荷载均须传至主梁。分层施工应按 5.5 m 层间段复核跨数，软连接和转弯位置不得视为侧向支承。

3.3 母线强度、热稳定与水平汇流段

母线屈服弯矩 $M_y=W\sigma_y=3.92$ MN·m。工况一下，1.20 m 跨距的跨内弯矩为 2.387 kN·m，母线应力仅 0.0487 MPa；K=2 时材料强度允许跨距为 34.38 m，故竖直段由绝缘子及其连接强度控制。母线本体应力裕度较大不代表支撑体系安全，仍需校核绝缘支撑和连接节点。

取 $J=(315.4\times10^3)^2\times0.05$ A²·s，由式（5）得绝热温升约 3.25×10^{-4}K。该结果仅说明工况一下整体导体热稳定不控制设计，不能外推至多源共同馈入工况，软连接和接头仍需校核。铝母线材料检验可参照 GB/T 5585.2—2018，定制截面性能应由制造图和供货试验确认[6]。

水平汇流母线不能直接沿用竖直分支结论。若 7571 kA 边界电流全部通过一对汇流母线，2 m 跨距对应弯矩约 3.821 MN·m，母线应力约 77.99 MPa，已接近计算屈服强度且未计入安全和动态裕度，故须另行复核水平段电流分配和支架受力。

4 结论

（1）竖直母线宜按支撑跨距而非总高度设计。315.4 kA 可作为整流侧反送隔离时的分支设计边界；78.9 kA 仅用于等电流分配敏感性比较，二极管汇流侧故障应按多源共同馈入校核。

（2）动态效应未明确前，5 kN·m 绝缘子宜按约 1.0 m 跨距布置；20 kN·m 高强支撑可减少固定点，但须校核金具和平台主梁。竖直段由绝缘子及其连接控制，荷载应传至平台主梁。

（3）母线弯曲和绝热温升不控制工况一的竖直段设计，水平汇流段在多源边界下需加强校核。在防反隔离和支撑条件落实后，本三层布置方案可行；后续应以三维电磁仿真获得电动力分布，再通过结构有限元分析校核应力、位移和支撑反力，确定 Ks 与动态系数。

参考文献：

[1] POZZOBON P.Transient and steady-state short-circuit currents in rectifiers for DC traction supply[J].IEEE Transactions on Vehicular Technology,1998,47(4):1390-1404.DOI:10.1109/25.728534.

[2] WEI Q,NI G,FENG J,et al.Research on dynamic and thermal effects based on the calculation of the short-circuit current in low-voltage DC distribution systems for civil buildings[J].Applied Sciences,2023,13(20):11543.DOI:10.3390/app132011543.

[3] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.Short-circuit currents in d.c.auxiliary installations in power plants and substations—Part 2:Calculation of effects:IEC 61660-2:1997[S].Geneva:IEC,1997.

[4] XIAO Y.Optimal design and simulation of rectifier DC copper bus support based on deflection constraint[C]//2023 International Conference on Electronics and Devices,Computational Science.IEEE,2023:88-92.DOI:10.1109/ICEDCS60513.2023.00021.

[5] SHEN B,ZHANG X,ZHOU D.Analysis and calculation of short-circuit electro-dynamic forces on rectangular bus bars[C]//2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference.Wuhan:IEEE,2009:2618-2621.DOI:10.1109/IPEMC.2009.5157849.

[6] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.电工用铜、铝及其合金母线第 2 部分：铝和铝合金母线:GB/T 5585.2—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.