

耐热导线在高限电率风电场集电线路的应用探讨

姜凯

湖南三一智慧新能源设计有限公司，湖南长沙，410199；

摘要：随着风电装机规模扩大，部分区域因电网消纳能力不足出现高限电问题，传统集电线路导线因输送容量有限、投资成本高，难以适配工程优化需求。[目的]本研究旨在探索耐热导线在高限电率风电场集电线路的应用可行性与价值，解决高限电率场景下风电工程建设投资优化问题。[方法]研究以高限电率风电场的35kV集电线路为核心对象，通过开展耐热导线的技术性能分析和经济性测算，验证其应用适配性。[结果]研究表明，在高限电率风电场中应用耐热导线，不仅能显著提升集电线路的输送容量，减少线路回路数，还可通过高限电率场景下“出力空缺覆盖额外损耗”的特性，使耐热导线的电能损耗成本降至可忽略水平，技术与经济优势双重凸显。[结论]在高限电率应用场景下，35kV集电线路采用耐热导线方案具有显著经济效益，可有效降低工程建设投资，同时兼顾技术可行性与经济合理性，为未来风电工程在高限电率场景下的降本增效及线路选型优化提供参考。对推动风电行业高效发展、助力“双碳”目标实现具有实践意义。

关键字：风电场；集电线路；耐热导线；限电率；经济性

DOI：10.69979/3041-0673.26.03.031

引言

目前，在新疆等高限电率风电场，存在建设成本高，收益率低下的问题，且风机机组机型朝着大容量的方向发展。每回35kV集电线路所能够承载的负荷存在一定限度，难以完全匹配这种机组大容量化的趋势。同时，在风电项目领域，66kV线路由于适配性及相关技术应用等问题，目前暂未找到合适的应用场景，风电场的输电电压等级主要局限于35kV，限制了输电能力和规模拓展。35kV集电线路耐热导线的应用，有利于应对机组大容量化的趋势^[1-2]。

鉴于以上行业发展的趋势以及客观条件限制，风电场35kV集电线路可考虑采用耐热导线，可提高集电线路单回输送能力，降低集电线路回路数，对风电场降低成本具有重大的现实意义。

1 耐热铝合金导线性能分析

1.1 特性

耐热导线即适当提高导线允许温度，可以增大系统事故稳定载流量，从而提高线路正常输送能力。该导线具有耐高温、输送容量大等技术特点，常应用于电网输电线路增容改造^[3-4]。

(1) 长期工作温度150℃，短时温度可达180℃，从而连续容许载流量为同规格普通导线的1.5~1.6倍。

(2) 常温下，与普通铝线有着相同的强度，高温

运行机械强度保持率能保持在90%以上。钢芯提供抗拉强度(≥160 MPa)，耐热铝合金层承担载流功能。绞合后导线需通过拉断力测试，保证额定拉断力≥95%标准值。

(3) 无论在常温还是在高温，与普通铝线相比均保持有相同程度的蠕变特性。与常规钢芯铝绞线(ACSR)安装方法相同，无需改造铁塔。

1.2 执行标准

(1) 耐热铝合金导线用耐热铝合金圆线执行《架空绞线用耐热铝合金线》(GB/T 30551-2014)。

(2) 耐热铝合金导线用镀锌钢丝执行GB/T 3428标准(等同采用IEC 60888:1987标准)。

(3) 耐热铝合金导线产品执行《钢芯耐热铝合金架空导线》(NB/T 42060-2015)。

1.3 导线优势

(1) 运行温度可以达到150℃，满足线路容量需求；

(2) 采用型线结构，通过调整铝钢比，弧垂可满足要求，无需换塔；

(3) 配套金具成熟，施工方便。

1.4 性能特性

钢芯耐热铝合金导线和普通钢芯铝绞线在高温且大档距情况下，弧垂才有明显区别，以JL/G1A-240/30

钢芯铝绞线和 JNRLH1/G1A-240/30 为例进行弧垂分析，代表档距 400m，弧垂分别为 12.95m、14.15m，相差约 1.2m。35kV 线路常用平均档距约为 260m，此条件下，弧垂相差为 0.8m。

其余工况下，两种导线的弧垂基本没有差异。

由此可知，使用耐热导线时，弧垂会增加 10%~15% 左右，铁塔呼高根据实际交跨情况需要适当提升。采用小规格满足大容量需求，或可以小规格代替大规格导线使用，可节省导线和杆塔投资费用，降低运行投资成本。

1.5 耐热导线配套金具

1.5.1 概述

使用耐热导线提升载流量时，大电流引起的金具发热问题变得极其关键和突出。传统金具无法承受耐热导

线所允许的高温环境，会导致机械强度下降、蠕变松弛、接触恶化、加速老化甚至失效。必须选用与耐热导线最高运行温度相匹配的专用配套耐热金具，确保整个输电线路在大电流、高温工况下的安全稳定运行。

1.5.2 悬垂线夹的温升试验

(1) 核心目标

温升试验旨在评估悬垂线夹在大电流或雷击瞬间通过时的发热特性，确保其在高温环境下机械强度、导电性和抗蠕变性能满足安全运行要求，预防断线事故。

(2) 试验项目：温升专项试验，需模拟实际工况的热效应。

(3) 试验结果

导线在 150℃ 长期运行时，悬垂本体、预绞丝、U 型挂环、绝缘子、室温的温度如下：

表 1 温升数据结果表

测温点 温度 (°C)	导线	悬垂线夹	预绞丝	挂环	绝缘子	室温
850	150	80	60	30	20	25
900	180	90	70	35	25	25
950	210	100	80	40	30	25
1000	225	110	85	40	30	25
1050	235	120	85	40	30	25
1100	250	130	95	45	35	25

由表可知，与耐热导线直接接触的悬垂线夹、预绞丝等金具与导线温升呈正相关，与耐热导线间接接触的挂环、

绝缘子等金具温度上升不明显，室内环境温度几乎无变化。

因此，与耐热导线直接接触的相关金具应选用耐热型金具，确保输电线路在大电流、高温工况下的安全稳定运行。

2 风电场应用实例

2.1 35kV 集电线路方案对比

某项目位于新疆自治区吐鲁番境内，风电场规划建设 50 台单机容量为 10MW 的风力发电机组，总容量为 500MW。

方案一：

采用普通 JL/G1A-240/30 钢芯铝绞线方案：

环境温度 25℃，导线允许温度 70℃ 条件下，JL/G1A-240/30 钢芯铝绞线载流量为 598A，极限输送容

量为 36.25MW，考虑风机容量超发 10%，所以单回导线携带的风机台数为 3 台。

本工程 35kV 集电线路路径总长 115km，其中采用单回 JL/G1A-240/30 架空线路路径长 35.2km，双回 JL/G1A-240/30 架空线路路径长 68.9km，采用 ZC-YJLY23-26/35kV-3 × 120 电缆长 7.5km，采用 YJY62-26/35kV-1 × 500 电缆长 3.4km。

方案二：

采用 JNRLH60/G1A-240/30 钢芯耐热铝合金导线方案：

导线允许温度 150℃ 条件下，JNRLH60/G1A-240/30 钢芯耐热铝合金导线载流量为 1006A，极限输送容量为 60.95MW，考虑风机容量超发 10%，所以单回导线携带的风机台数为 5 台。

本工程 35kV 集电线路路径总长 91.7km，其中采用

单回 JNRLH60/G1A-240/30 架空线路路径长 42.9km，双回 JNRLH60/G1A-240/30 架空线路路径长 39.3km，采用 ZC-YJLY23-26/35kV-3×120 电缆长 7.5km，采用双拼

YJY62-26/35kV-1×400 电缆长 2km。

2.2 导线性能对比及经济性分析

表 2 导线机械、电气性能对比表

项目	单位	JL/G1A-240/30	JNRLH60/G1A-240/30
铝/铝合金	No/mm	24/3.6	24/3.6
钢芯	No/mm	7/2.4	7/2.4
导线直径	mm	21.6	21.6
20℃直流电阻	Ω/km	0.1181	0.1201
单位长度质量	kg/km	922.2	921
额定拉断力	kN	75620	75680
导线载流量	A	598	1006
单回极限输送容量	MW	36.25	60.95
风机台数	10MW/台	3	5

表 3 投资费用对比表

项目	单位	方案一	方案二
单回路路径长	km	35.2	42.9
双回路路径长	km	68.9	39.3
工程造价	万元	8565	6804
造价对比		基准	-20.6% (-1725)

表 4 运行费用对比表

项目	单位	方案一	方案二
导线传输电流	A	494	825
导线交流电阻	Ω/km	0.1181	0.1201
线路电阻损耗	kw/km	86.46	245.23
线路长度(折单)	km	173	121.5
年发电小时数	h	2500	2500
线路年度电能损耗	万 kwh	3739.48	7448.84

由上表分析可知，对于风电场建设方，采用耐热导线，投资建设成本低于普通导线方案，经济性更优，但因为电能损耗严重，运行费用更高。

本工程位于新疆地区，目前项目限电率约为 30%，年损耗电能为 40500 万 kwh，则耐热导线电能损耗可忽略不计，费用暂不考虑。

注：本工程限电率大于 6%时，理论计算情况下，耐热导线导线损耗即可被限电覆盖。

3 限电分析

3.1 限电的基本原理

风电场限电（也称“弃风限电”）是指电网或风电场主动控制风电出力，使其低于理论最大发电能力的运行方式。限电的基本原理是动态调节而非总量封顶，限

电并非简单设定发电总量上限，而是通过实时调节风机的输出功率来实现的。

风电场限电的本质是通过实时控制风机出力（限制瞬时功率），避免电网过载或崩溃，其后果表现为总发电量的损失。

3.2 限电率对方案的影响

限电率（或称“弃风率”）指风电场因非自身设备原因导致的可发电量未能实际发出的比例。其核心是排除风机故障、检修等场内因素后，因外部限制造成的发电损失。

在限电严重的地区，受限电量值主要是电网原因系统受限。

因此采用耐热导线方案，因耐热导线技术方案额外产生的电量损失，可被同期的限电覆盖，不产生额外的损耗成本。

限电率 $\geq \frac{\text{年损耗电量(万 MW}\cdot\text{h)}}{\text{理论年发电量(万 MW}\cdot\text{h)}} \times 100\%$ ，一般来说限电率大于 10%即可满足要求。

①电能损耗：指电能在生产、传输、分配、转换及使用过程中，因能量形式转化、设备自身特性或外界环境影响，产生的能量损失，是衡量能源利用效率的核心指标之一。

②理论年发电量：是评估风力发电机组发电能力的理论指标，指在标准条件下通过数学模型估算的全年电能产量。

4 结论

本研究围绕耐热导线在风电场的应用价值展开分

析,结果表明,耐热导线在风电场领域具备明确的应用前景,其核心优势在于能通过提高单回输送线路容量、减少集电线路回路数,显著降低风电项目的一次投资规模、压缩工程建设成本,为风电项目的经济性提升提供关键支撑。

需客观指出的是,耐热导线的应用存在一定限制性条件,其电能损耗水平相对常规导线更高,这是制约其大规模推广的主要因素。但该限制在特定场景下可实现有效规避——在高限电率风电场中,由于风机实际出力时间占比低、线路实际负荷率远低于设计值,耐热导线产生的额外电能损耗可被限电导致的“出力空缺”完全覆盖,此时其损耗成本可基本忽略,应用限制性大幅减弱。

进一步聚焦风电项目的具体实践场景,35kV集电线路作为风电场电能汇集与传输的核心环节,是耐热导线的适宜应用载体。结合高限电率风电场的运行特性,耐热导线在该场景下不仅能突破损耗制约,更能充分发挥其成本优势,展现出良好的经济效益与可行性。

综上,耐热导线在风电项目中并非普适性选择,但在35kV集电线路及高限电率风电场这一特定组合场景下,其应用价值突出,可为风电项目的集电线路导线选型提供兼具经济性与实用性的解决方案,也为未来风电工程降本提供了参考方向。

参考文献

[1] 万建成,朱宽军,刘胜春,等. 国产耐热导线的机电性能研究[J]. 电力建设,2008,29(12):37-40. DOI:10.3969/j.issn.1000-7229.2008.12.010.
Wan J C, Zhu K J, Liu S C, et al. Study on electromechanical properties of domestic heat-resistant conductors[J]. Electric Power Construct

ion, 2008, 29(12): 37-40. DOI:10.3969/j.issn.1000-7229.2008.12.010.

[2] 刘俊勇,罗文. 用于架空输电线的不同耐热导线的比较分析[J]. 电网与清洁能源,2011,27(3):29-33. DOI:10.3969/j.issn.1674-3814.2011.03.007.

Liu J Y, Luo W. Comparative analysis of different heat-resistant conductors for overhead transmission lines[J]. Power Grid & Clean Energy, 2011, 27(3): 29-33. DOI:10.3969/j.issn.1674-3814.2011.03.007.

[3] 王晓栋,冯彪,姚虹. 耐热导线在工程中的应用[C]//2012年江苏省电机工程学会输配电及电力系统专委会学术年会论文集. 2012:131-133.

Wang X D, Feng B, Yao H. The application of heat-resistant conductors in engineering[C]//Proceedings of the Academic Annual Conference of Specialized Committee on Transmission, Distribution and Power Systems, Jiangsu Society of Electrical Engineering, 2012: 131-133.

[4] 李爱国. 耐热导线用于输电线路的增容[J]. 油气田地面工程,2014(8):112-112. DOI:10.3969/j.issn.1006-6896.2014.8.077.

Li A G. The application of heat-resistant conductors for capacity increase of transmission lines[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2014(8): 112-112. DOI:10.3969/j.issn.1006-6896.2014.8.077.

作者简介:姜凯(1995-),男,汉族,湖南省常德人,工程师,本科,主要研究方向为输电线路电气设计工作。