

基于配重优化的均压环风振抑制方法研究

张友安, 王希, 张成成, 魏春茹

(新程(辽宁)电力电容器科技有限公司, 辽宁 营口 115007)

摘要:均压环作为高压输电设备中均化电场的关键部件,常因风载荷作用引发振动,导致结构疲劳甚至断裂。本文提出一种通过增加配重优化均压环动力特性的风振抑制方法。首先建立均压环-配重系统的动力学模型,分析配重对固有频率和振型的调控机制;其次通过有限元仿真验证提高配重方案对风振频率的抑制效果;最后结合新疆哈密某换流站电容器组配套均压环风振案例,验证配重优化方案的工程适用性。。

关键词:均压环; 漩涡脱落频率; 风振抑制; 配重优化; 固有频率

Research on Wind-induced Vibration Suppression Method for Grading Rings Based on Counterweight Optimization

ZHANG Youan, WANG Xi, ZHANG Chengcheng, WEI Chunru

(Xincheng (Liaoning) Power Capacitor Technology Co., Ltd., Liaoning Yingkou 115007, China)

Abstract: The grading rings, as a key part for electric field homogenization in high-voltage transmission equipment, often experience vibrations induced by wind loads, leading to structural fatigue or even fracture. In this paper a wind-induced vibration suppression method by optimizing the dynamic characteristics of grading rings through counterweight addition is proposed. First, a dynamic model of the grading ring-counterweight system is set up to analyze the regulatory mechanism of counterweights on natural frequencies and vibration modes. Then, finite element simulation is used to verify the vibration suppression effect of the counterweight-enhanced scheme on wind-induced frequencies. Finally, the engineering applicability of the counterweight optimization scheme is verified through a case study of wind-induced vibrations in grading rings installed on capacitor banks at a converter station in Hami, Xinjiang.

Keywords: grading rings; vortex shedding frequency; wind-induced vibration suppression; counterweight optimization; natural frequency

0 引言

均压环是电容器塔中重要的辅助设备,主要用于优化电场分布、抑制放电现象、平衡电压及保护设备,确保设备在高压环境下的安全稳定运行。均压环作为高压输电设备均化电场的关键部件,在强风环境下易因涡激振动引发结构疲劳甚至断裂,威胁电网安全运行。当前风振抑制主要采用结构优化、阻尼技术和频率调谐3类方法,但在复杂风场或空间受限场景中应用效果受限。近年来通过配重优化^[1]法在桥梁等领域展现出优异动力特性调控能力,但其在均压环风振抑制中的机理与应用尚未

系统研究。

本文提出基于配重优化的均压环风振抑制方法,通过理论建模与仿真分析揭示配重对固有频率的调控规律。结合新疆哈密某换流站均压环风振案例,验证方案在工程场景中的有效性,为解决高压设备风致振动问题提供经济可靠的新路径。

1 均压环风振机理分析

1.1 均压环结构及环境条件分析

2025年2月某日新疆哈密某换流站突发大风天气,地面2m处测得最大瞬时风速约16.2m/s,站内BP11电容器塔设备均压环出现振动现象。

该工程选址位于新疆维吾尔自治区哈密市巴里坤县,海拔高度 1 180 m,是新疆著名的风口区域之一,年均风速可达 6~8 m/s,春季和秋季风力最强,瞬时风速可达 10 级以上,局部区域年大风日数超过 100 天^[1-4]。

恶劣的大风天气条件往往会导致强风在设备表面形成不规则的涡流脱落,导致周期性激振力,特别是圆柱形结构,在特定风速下可能导致发生涡激振动^[5],引发共振,加剧结构疲劳,长期作用可能导致焊缝开裂^[6-9]或螺栓松动。

本工程 BP11 电容器装置采用单层台架逐层堆积的积木 Flow-Induced 结构,叠装 19 层,总高 18.1 m,根据电位分布,在 7~19 层加装均压环,起始均压环距地高度 7.4 m,层间距 0.8 m,整体结构见图 1。

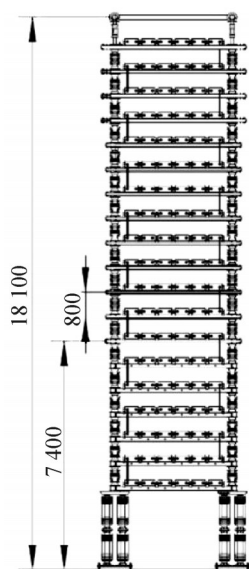


图1 电容器塔整体示意图

Fig. 1 Overall schematic diagram of capacitor tower

均压环主体采用 L3 铝材质,结构为矩形弯曲设计,呈现开口式环形结构,两端设有抱箍式固定金具连接部件,安装示意图图 2。

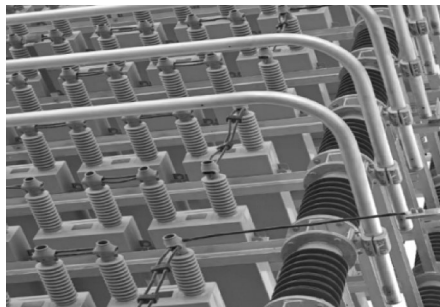


图2 电容器塔均压环安装示意图

Fig. 2 Installation schematic diagram of gradign rings of capacitor tower

大风天气下,振动均压环位于电容器塔第 9 层

(距地高度约 9 m),振动呈现小幅、高频特性。考虑均压环设备振动可能加速设备老化、增加运行损耗和检修需求,重则导致设备故障、大规模停电,需采取有效措施抑制大风天气下设备摆动幅值及频率。

针对此风振现象,现对风力等级、均压环设计结构、模态振型、风致漩涡脱落频率等进行研究,分析风振机理及抑制风振措施。

1.2 换流站风力等级分析

现场实测高度 $h_0=2$ m、风速 $v_0=16.2$ m/s,推导出变电站所处位置对应的风力等级如下:

使用幂定律(Power Law)^[10]换算特征高度 $h=10$ m 处风速。

$$v_{(h)} = v_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

参考巴里坤高海拔、风口的地区效应,结合特高压变电站设备密集程度和高度,查询相关标准及文献(GB 50260、DL/T 5550、GB/T 18710),结合类似地区实测数据报告,巴里坤与达坂城^[11-12]同属新疆风口地区、海拔高度接近,根据《中国风能资源评估报告》及《新疆风能资源详查》中给出,达坂城地区风速剖面指数 α 值统计范围为 0.25~0.33,中位数约 0.29,综合考虑 α 取值 0.29。

代入式(1),计算得出 $v_{(10)} \approx 25.84$ m/s,处于 10 级风力范畴。

依据换流站现场观测数据,振动均压环距地高度约 9 m 处,即计算得出 $v_{(9)} \approx 25.1$ m/s。

1.3 均压环设计参数及振动原因分析

均压环模型及边界条件示意图如图 3 所示。均压环设计为中空圆环结构,外径 $D=\Phi 70$ mm,内径 $d=\Phi 64$ mm,两端通过金具固定于设备主体(约束全部自由度)。

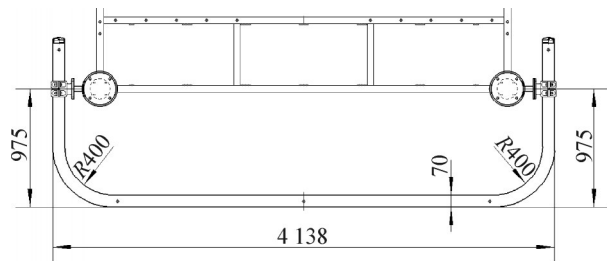


图3 均压环模型及边界条件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of grading rings module and boundary consitions

振动特征位于主体长方向,振幅形态为高频、低幅值。分析均压环发生振动的原因:

1)均压环本体固有频率与风频 f_{wind} (实测 0.1~1 Hz)共振引发抖振。

2)均压环本体固有频率与风致漩涡脱落频率共振引发谐振。

下文对风致漩涡脱落频率及均压环均压环本体固有频率进行计算及仿真分析。

1.4 均压环振型模态 ANSYS有限元仿真分析

考虑均压环 U 形的设计结构以及不同模态下计算的复杂程度,均压环各阶态自振频率通过 ANSYS 仿真得出,建立如图 4 模型。

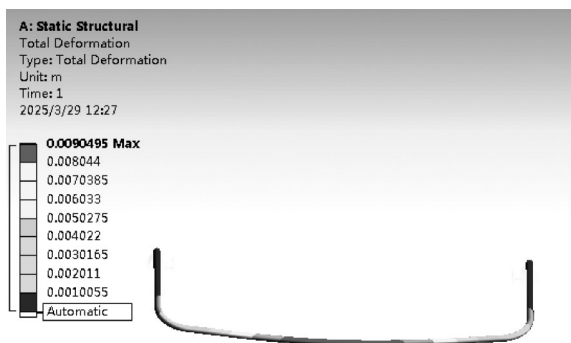


图4 均压环 ANSYS有限元模型

Fig. 4 ANSYS finite element module of grading rings

振动特征长度 4 138 mm,矩形弯曲主体短边 1 100 mm,固定约束点距特征长度 975 mm。

模型采用六面体单元划分,网格尺寸 10 mm,满足模态分析收敛性要求^[13],均压环固有频率如图 5 所示。

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	12.324
2	2.	20.689
3	3.	25.428
4	4.	29.919
5	5.	44.723
6	6.	60.523

图5 均压环固有频率 f_n

Fig. 5 Natural frequency f_n of grading rings

分析图 5 可知,均压环固有频率 $f_n > 12f_{wind}$,不满足均压环发生抖振的条件。即考虑均压环发生振动的原因是否为本体固有频率与风致漩涡脱落频率共振引发谐振造成。

1.5 均压环漩涡脱落频率计算分析

固有频率与风致漩涡脱落频率共振:当空气流经均压环时,流体横向绕流产生的周期性漩涡脱落驱动导致共振,从而引发结构振动。

漩涡脱落频率^[14]计算公式为

$$f_{\text{vortex}} = \frac{S_t V}{D} \quad (2)$$

式中, S_t (斯特劳哈尔数),描述非正常流动现象的无

量纲数,取值范围为 0.1~0.3,该取值范围受雷诺数^[15]影响。

雷诺数公式为

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (3)$$

式中: ν 为空气运动黏度,标准状态下取 $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$;特征直径 $D = \Phi 0.07 \text{ m}$; V 为对应高度下计算得出的风速 $V_{(9)} \approx 25.1 \text{ m/s}$ 。代入式(3),计算得出 $R_e = 1.17 \times 10^5$ 。需要注意的是当雷诺数处于亚临界区^[18](大约在 $3 \times 10^2 \sim 2 \times 10^5$ 之间)时,斯特劳哈尔数 S_t 约为 0.15~0.2。

流动处于亚临界区域,且均压环为矩形弯曲管,截面形状偏离标准圆柱体, S_t 近似取均值 0.18^[15]。

将 S_t 值代入式(2),计算得出 $f_{\text{vortex}} \approx 64.5 \text{ Hz}$,对比图 5 均压环固有频率, f_{vortex} 与均压环 6 阶固有频率近似,比值为 1.06。

通常认为,当风频与固有频率的偏差在 $\pm 20\%$ 以内时,可能引发谐振效应^[16-19]。考虑到均压环高频、低幅值的振动特征,考虑振动由其引起。

当雷诺数值处于亚临界区域时,其 S_t 值一般为一恒定数,结合式(2)-(3)可知, f_{vortex} 随风速 V 的增大而增大,理论上可通过降低均压环自身固有频率以避开强风天气下风致漩涡脱落频率的共振区间。

对于已安装成型的设备,传统的均压环风振抑制措施操作难度大且成本高,本文提出一种通过增加配重的方法,用以改善均压环风振问题。

2 配重优化的均压环风振抑制

2.1 配重优化均压环风振原理分析

设计宗旨降低均压环高阶固有频率。

均压环固有频率 f_n 由刚度和质量^[20-21]决定,公式为

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

式中: k 为结构刚度, N/m ; m 为系统质量, kg 。

由式(4)可知,可通过配重优化 Δm 改变系统等效质量,调整固有频率,公式为

$$f'_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m + \Delta m}} \quad (5)$$

式中, Δm 为配重等效质量,合理设计 Δm 的质量及位置,使 f'_n 偏离漩涡脱落频率主要能量区间。

2.2 配重优化均压环设计方法

1)配重质量计算

由式(4)可得出

$$f_n \propto \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (6)$$

若需固有频率降低 20% ($f'_n = 0.8f_n$), 则等效质量需增加至原值的 1.56 倍 ($\Delta m = 0.56 m$)。均压环质量 $m = 9.2 \text{ kg}$ 时, 理论配重 $\Delta m = 5.2 \text{ kg}$ 。

2) 配重位置分析

根据等效质量理论, 配重对某阶模态的调控效果由其位置处的振型振幅决定, 当配重位于模态振型的反节点(位移最大点)时, 其等效质量贡献最大, 频率调节效果显著; 反之, 若位于节点(位移零点), 则等效质量趋近于零。

1 阶振动的最大位移通常位于铝管中部, 在此处增加配重能直接增加模态质量, 显著降低一阶固有频率。6 阶模态其振型通常在铝管的 1/6、1/2、5/6 处为反节点^[22-24], 在此处安装配重可以最大程度降低 6 阶固有频率。

以下提出 3 种配重方案:

- 1) 振动梁特征 1/2 处增加 4 kg 配重;
- 2) 振动特征 1/6、5/6 处各增加 3 kg 配重;
- 3) 振动特征 1/6、1/2、5/6 各增加 2 kg 配重。

注: 特征长度中部减小配重质量, 以降低静态下均压环受重力的形变; 分散布置配重设计以降低局部应力, 适当增加整体配重质量, 以达到更好的频率优化。

2.3 均压环配重优化 ANSYS 有限元仿真分析

基于上述对配重位置的理论分析, 分别对配重装配于中间及两侧进行 ANSYS 仿真。

1) 配重置于均压环中部

均压环中间配重 ANSYS 模型见图 6, 考虑配重增加在中部会增大均压环在静态下的形变, 适当降低配重至 4 kg, $f'_n = 0.83f_n$ 。

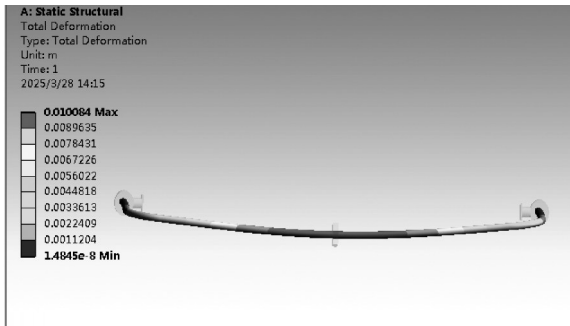


图6 均压环中间配重 ANSYS 模型
Fig. 6 ANSYS model of the central counterweight of grading rings

均压环中间配重固有频率应模态振型如图 7 所示。配重为置于中部的 4 kg 镀锌钢块。

	Mode	☒ Frequency [Hz]
1	1.	8.7174
2	2.	13.618
3	3.	20.882
4	4.	29.843
5	5.	39.519
6	6.	59.315

图7 均压环中间配重固有频率
Fig. 7 Natural frequency of the central counterweight of grading rings

对比图 5 无配重固有频率与图 7 中间配重固有频率, 分析增加配重对均压环固有频率的影响, 详见表 1。

表1 均压环中部配重与无配重参数对照
Table 1 Paramater comparison with and without central central counterweigh of grading rings

阶频	无配重频率/Hz	两端配重频率/Hz	频率衰减/%
1	12.324	8.717 4	29.26
2	20.689	13.618 0	34.18
3	25.428	20.882 0	17.88
4	29.919	29.843 0	0.25
5	44.723	39.519 0	11.64
6	60.523	59.315 0	2.00

均压环中间增加配重, 对低阶频率衰减显著, 高阶振幅衰减作用降低, 符合 1 阶振动的模态振型, 但不适用于本工程高阶谐振。

2) 配重置于均压环两侧

均压环两侧配重 ANSYS 模型见图 8, 结合实际安装条件, 最终采用对称分布的两端各 3.0 kg 配重, 兼顾频率调谐与结构可靠性, $f'_n = 0.778f_n$ 。

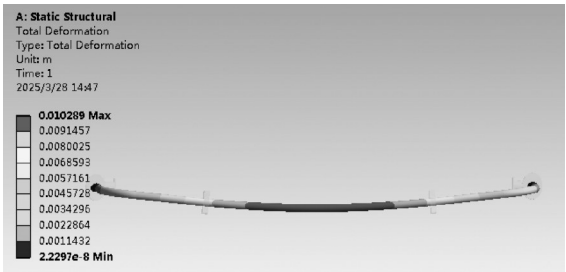


图8 均压环两侧配重 ANSYS 模型
Fig. 8 ANSYS model with counterweight on both sides of grading rings

配重为对称分布的 6 kg 镀锌钢块, 间距 2 200 mm, 均压环两侧配重固有频率对应模态振型如下图 9 所示。配重为对称分布的 6 kg 镀锌钢块, 间距 2 200 mm。

Tabular Data		
	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	9.2788
2	2.	16.537
3	3.	18.359
4	4.	20.438
5	5.	39.165
6	6.	41.91

图9 均压环两侧配重固有频率
Fig. 9 Natural frequency with counterweigh on both sides of grading rings

均压环两侧配重与无配重参数对照见表2。由表2可以看出,均压环两侧增加配重,对低阶、偶数次高阶频率优化均有显著效果,均压环6阶固有频率下降30.7%。64.5 Hz/41.91 Hz≈1.54>1.2,可避开10级风 f_{vortex} 与均压环固有频率之间的频率共振^[25-26]。

表2 均压环两侧配重与无配重参数对照
Table 2 Parameter comparison with and without counterweigh on both sides of grading rings

阶频	无配重频率/Hz	两端配重频率/Hz	频率衰减/%
1	12.324	9.278 8	24.70
2	20.689	16.537 0	20.00
3	25.428	18.359 0	27.80
4	29.919	20.438 0	31.70
5	44.723	39.165 0	12.40
6	60.523	41.910 0	30.70

3) 配重置于均压环两侧及中部

均压环中部及两侧配重 ANSYS 模型见图10,采用对称分布的两端、中部各2.0 kg配重, $f_n'=0.778f_n$ 。

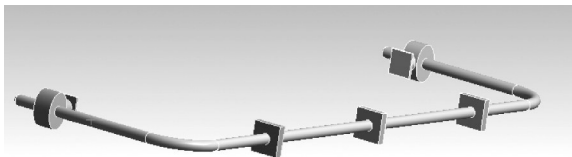


图10 均压环中部及两侧配重ANSYS模型
Fig. 10 ANSYS model with counterweigh on center and both sides of grading rings

配重为对称分布的6 kg镀锌钢块,间距1 100 mm。对应模态振型如图11所示。均压环3点配重与无配重参数对照见表3。

由表3数据对比分析,均压环1-6阶固有频率与均压环两侧配重优化效果相差不大,考虑制作成本,本工程则两侧配重可作为抑制均压环谐振的最优方案。

	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	8.7443
2	2.	14.558
3	3.	18.703
4	4.	22.595
5	5.	37.579
6	6.	43.076

图11 均压环中部及两侧配重固有频率
Fig. 11 Natural frequency with counterweigh on center and both sides of grading rings

表3 均压环3点配重与无配重参数对照
Table 3 Parameter comparison with three point counterweigh and without counterweigh of grading rings

阶频	无配重频率/Hz	3点配重频率/Hz	频率衰减/%
1	12.324	8.744 3	29.00
2	20.689	14.558 0	29.60
3	25.428	18.703 0	26.50
4	29.919	22.595 0	24.50
5	44.723	37.579 0	16.00
6	60.523	43.076 0	28.80

根据谐振区间公式

$$0.833 \leq \frac{f_{\text{vortex}}}{f_n} \leq 1.2 \tag{7}$$

将式(2)代入式(7),可得出谐振状态下风速 V 与固有频率 f_n 关系式为

$$0.324f_n \leq V \leq 0.467f_n \tag{8}$$

式中: f_n 为均压环固有频率; V 为谐振状态下对应的风速。

将图5固有频率值代入式(8)中,得出表4无配重均压环与双侧配重均压环不同阶频、不同风速下可发生谐振的区间对比。

表4 不同阶频下谐振的风速范围对比
Table 4 Comparison of wind speed ranges for resonance under different modal frequencies

阶频	无配重风速 m/s	两端配重风速 m/s
1	4~5.8(3级)	3~4.3(2~3级)
2	6.7~9.7(4~5级)	5.4~7.7(4级)
3	8.2~11.9(5级)	5.9~8.6(4级)
4	9.7~14(5~6级)	6.6~9.5(4~5级)
5	14.5~20.9(7~8级)	12.7~18.3(6~8级)
6	19.6~28.3(8~10级)	13.6~19.6(7~8级)

由表4对比分析,对于不设置阻尼线均压环设备,其本身固有频率与风致漩涡脱落频率之间,在不同风速下均会发生不同阶频的谐振,两端配重相较于无配重均压环,其目的为降低均压环自身固有频率,避开烈风(9级)及以上风力下与均压环之间

发生谐振的几率,降低振动幅值及频率。

工程设计需结合安全余量、成本、工况综合评估,工程上不允许有害共振发生,强风以下依靠均压环本身设计结构、材质,以自身阻尼耗散能力消耗激振能量输入,系统振动不会累积,抑制振幅的叠加。

2.4 均压环共振幅值分析

上文提到,均压环本身设计结构造成本身自振频率与漩涡脱落频率之间的共振几乎不可避免,设计阶段就需考虑风带给均压环的能量输入需被自身结构消耗掉,否则会造成谐振振幅的叠加,而引起大幅度振动。

共振时,振幅 X 由激振力幅值 F_0 、阻尼比 ζ 和系统参数决定^[27-28]。

$$X = \frac{F_0}{2\zeta k} \quad (9)$$

$$F_0 = 0.5\rho_{\text{air}} V^2 DC_1 \quad (10)$$

$$k = (2\pi f_n)^2 m \quad (11)$$

ISO 4354《结构上的风作用》第 6.3.2 节指出,对于圆形截面结构,亚临界雷诺数区间($3 \times 10^4 < Re < 2 \times 10^5$)的升力系数建议取 0.2~0.35,均压环振动特征长度视为光滑圆柱体,参考计算雷诺数 Re ,升力系数 C_1 取值 0.3^[29]。

中国电力科学研究院的《变电站母线微风振动分析》(2018)^[30]提到,在无实测数据时,铝管母的阻尼比常按 0.001~0.003 进行保守计算。本工程管母阻尼比 ζ 取 0.001^[31],本工程后期对均压环采用热缩护套进行包覆,硅橡胶热缩护套通过分子链黏弹性耗能, ζ_{aid} 可增加约 0.002~0.003^[32-35],实际阻尼比 ζ 取 0.004。

m 为特征长度重量,无配重 $m_0 \approx 9.2 \text{ kg}$;两点配重 $m_2 \approx 15.2 \text{ kg}$; ρ_{air} 按海拔 1 200 m 修正后取值 1.07 kg/m^3 (标准大气压、不考虑温度变化)^[32]。

上述参数代入式(9),计算得出不同风速下均压环共振后振幅为

$$X = 0.03557 \frac{V^2}{f_n^2 m} \quad (12)$$

计算最大风速下 6 阶谐振无配重与两端配重:无配重振幅 X_6 : 0.845 3 mm;两点配重振幅 X_6 : 0.511 8 mm;6 阶谐振状态下,基础振幅 X 降低幅度达到 39.5%。

2.5 配重后能量输入与能量耗散分析

以均压环两侧配重、最大风力 8 时 f_{vortex} 与均压环 f_n 发生共振,对比分析能量输入与能量耗散。

参考式(9)~(10),风速 19.6 m/s 时, $F_0 \approx 4.3 \text{ N}$, $X \approx 0.5118 \text{ mm}$ 。

1)输入能量/周期(谐振状态)^[27],公式为

$$E_{\text{input}} = \pi F_0 X \quad (13)$$

2)临界阻尼系数^[33],公式为

$$c_{\text{critical}} = 2m\omega \quad (14)$$

ω 为均压环两侧配重 6 阶角频率, $m = 15.2 \text{ kg}$ 。

3)实际阻尼系数,公式为

$$c = \zeta c_{\text{critical}} \quad (15)$$

4)耗散能量/周期(E_{diss})^[19],公式为

$$E_{\text{diss}} = \frac{c\omega X^2}{2} + k\alpha\pi F_0 V^2 X \quad (16)$$

式中: k 为折减因子,当雷诺数 $8 \times 10^4 < Re < 10^5$ 时,取 $k = 0.7$ ^[34]; α 为流速平方项阻尼系数(s^2/m^2),参照 GB/T 38753—2020 附录 F.3 等相关文献综合分析,硅橡胶包覆均压环, $\alpha = 0.00015$ ^[36]。

5)能量平衡分析

平衡条件:令 $E_{\text{input}} = E_{\text{diss}}$,化简得出

$$X = \frac{\pi F_0 (1 - k\alpha V^2)}{\zeta m \omega^2} \quad (17)$$

解得 19.6 m/s 风速下稳态振幅 $X \approx 3.075 \text{ mm}$ 。

根据材料力学准则,考虑风振下动态放大效应,最大允许形变^[37-38]为

$$\delta_{\text{max}} \leq \frac{\varepsilon_{\text{allow}} \times L_{\text{eff}}}{K_d} \quad (18)$$

式中: $\varepsilon_{\text{allow}}$ 为 L3 铝许用应变,取值 0.15%; L_{eff} 为均压环特征长度 4.138 m; K_d 为动态系数(1.5~2.0)^[39],结合风速 $< 20 \text{ m/s}$,且均压环护套阻尼增强,综合以上 K_d 取值 1.8。

计算得出允许最大形变 $\delta_{\text{max}} \leq 3.45 \text{ mm}$,大于 8 级风稳态振幅 3.075 mm,满足长期运行。

3 均压环配重优化最终实施方案

结合上文配重位置分析及图(8)确定最终配重方案,具体实施如下:

1)振动特征方向两端对称配重,距中心间距各 1.1 m(振动特征方向不含圆弧段约 1/6、5/6 处)。

2)配重选用镀锌钢板(成本低,易加工),如图 12 所示。配重端部打磨成圆弧状,不影响均压环整体均衡电压,内径与均压环外径需高度匹配,以防外部环境因素造成配重松动。

3)固定螺栓配锁紧螺母(防止长期投运外界因素导致螺栓松动)。



图12 配重件
Fig. 12 Counterweight part

4)均压环采用热缩护套进行包覆,增加整体阻尼系数。

2025年5月均压环配重方案已应用于换流站设备改造。换流站均压环配重加固实施方案见图13。

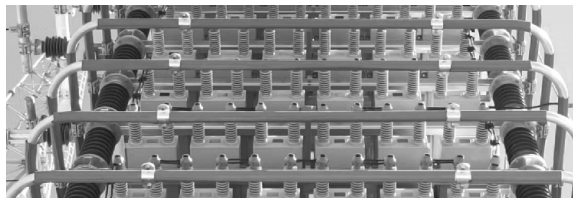


图13 换流站均压环配重加固实施方案
Fig. 13 Implementation plan for reinforcing the counterweight of the grading rings in converter station

投运期间观察设备运行状况,大风天气下均压环振动情况得到明显改善,实践证明配重方案可行且有效。

4 结语

配重优化的均压环风振抑制方法可作为风振事故处理的有效措施,其宗旨通过改变均压环固有频率以避开漩涡脱落频率的共振范围,设计需结合当地环境条件、安装地点、最大风速等外部因素,综合设备结构、尺寸等自身参数,结合经验或相关实验确定斯特劳哈尔数、阻尼比、升力系数等重要参数。设计过程虽相对复杂,但成本低、施工简单是其优势方向。

配重优化可有效抑制均压环风致共振。该方法兼顾经济性与可靠性,为高压输电设备防振设计提供新思路。

参考文献

- [1] LIU Y., CHEN Z., WANG L. Mass optimization for vibration control of transmission line grading rings under wind loads[J]. Engineering Structures, 2023, 285, 116032.
- [2] CHEN X., ZHANG H., LI W. Novel techniques for wind-induced vibration suppression of power transmission equip-

ment[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 221, 104920.

- [3] 谢运华. 新疆地区大风灾害强度研究综述[J]. 电力勘测设计, 2016, 28(S2): 122-127.

XIE Yunhua. Research on gale disasters strength in Xinjiang region[J]. Electric Power Survey & Design, 2016, 28(S2): 122-127.

- [4] 张爽, 刘海涛, 孙大伟, 等. 冲击性负荷接入下风能并网暂态电能扰动控制研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(10): 122-128.

ZHANG Shuang, LIU Haitao, SUN Dawei, et al. A study on the disturbance control of wind power grid connection transient energy under impact load access[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(10): 122-128.

- [5] 张阿漫, 王诗平, 白兆宏. 流固耦合力学[M]. 北京: 科学出版社, 2020.

- [6] WANG Xiao. CFD-based analysis of vortex shedding for non-circular cross-sections[J]. Engineering Structures, 2020, 213, 110567.

- [7] WU X. Recent advances in vortex-induced vibrations of slender structures[J]. Journal of Fluids and Structures, 2021, 102, 103245.

- [8] WU X., GE F., HONG Y. A review of recent studies on vortex-induced vibrations of long slender cylinders[J]. Journal of Fluids and Structures, 2012(28): 292 - 324.

- [9] 肖凯, 王振, 邹延生, 等. 高压直流输电工程换流阀均压电极断裂机理研究[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 43-51.

XIAO Kai, WANG Zhen, ZOU Yansheng, et al. Study on fracture mechanism of equalizing electrode of converter valve in HVDC projects[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 43-51.

- [10] 申萌, 王立山, 王子瑜, 等. 高海拔条件下550 kV空气绝缘隔离开关均压装置的结构优化[J]. 高压电器, 2023, 59(10): 79-87.

SHEN Meng, WANG Lishan, WANG Ziyu, et al. Structure optimization of grading device for 550 kV air-insulated disconnector under high altitude[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10): 79-87.

- [11] 周灵刚, 朱敏捷, 李建华. 风电场安全运行中的低温影响效应试验测试[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(5): 144-150.

ZHOU Linggang, ZHU Minjie, LI Jianhua. Testing of low temperature effects in the safe operation of wind farms[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(5): 144-150.

- [12] 全江华, 文正其, 张伟, 等. 基于Ansys Workbench的220 kV移动式负荷转供装置的振动响应分析[J]. 高压电器, 2024, 60(11): 217-224.

QUAN Jianghua, WEN Zhengqi, ZHANG Wei, et al. Vibration response analysis of 220 kV mobile load transfer de-

- vice based on Ansys Workbench[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11): 217-224.
- [13] 王旭鹏, 郝建, 钟尧, 等. 基于ILPSO-LSSVM的GIS设备隔离开关机械异响振动识别方法研究[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 172-183.
- WANG Xupeng, HAO Jian, ZHONG Yao, et al. Research on identification method of mechanical abnormal noise and vibration of disconnector for GIS based on ILPSO-LSSVM[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 172-183.
- [14] WHITE, F. M. Fluid mechanics[M]. McGraw-Hill, 2011.
- [15] REYNOLDS, O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1883: 174.
- [16] BATCHELOR, G. K. An introduction to fluid dynamics[M]. Cambridge University Press. 2000.
- [17] 刘成峰, 曾广众, 许智贤, 等. 强风下直线杆塔力学特性与加固方法研究[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 106-115.
- LIU Chengfeng, ZENG Guangzhong, XU Zhixian, et al. Research on mechanical characteristics and reinforcement method of linear tower under strong wind[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 106-115.
- [18] BLEVINS, R. D. Flow-induced vibration[M]. Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [19] Eurocode 1: Actions on structures—Part 1-4: General actions—wind actions actions; EN 1991-1-4: 2005[S]. 2005.
- [20] CLOUGH, R. W., PENZIEN, J. Dynamics of structures[M]. McGraw-Hill. 1993.
- [21] CHOPRA, A. K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering [M]. Pearson. 2020.
- [22] HOLMES, J. D. Wind loading of structures [M]. CRC Press, 2015.
- [23] MEIROVITCH, L. Fundamentals of vibrations[M]. McGraw-Hill, 2010.
- [24] RAO, S. S. Mechanical vibrations [M]. Pearson, 2019.
- [25] EWINS, D. J., WEEKES, B. Safe frequency separation criteria for avoiding lock-in vibrations[J]. Journal of Sound and Vibration, 2022: 523.
- [26] Mechanical vibration—Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating Parts: ISO 10816-1: 1995 [S]. 1995.
- [27] HOLMES, J. D. Wind loading of structures[M]. CRC Press. 2015.
- [28] International organization for standardization. wind actions on structures: ISO 4354: 2008[S]. 2008.
- [29] 中国电力科学研究院. 变电站母线微风振动分析[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2018.
- [30] 张刚, 戴建强, 谢强, 等. 服役输电线路风致响应及寿命预测分析[J]. 高压电器, 2024, 60(2): 200-209.
- ZHANG Gang, DAI Jianqiang, XIE Qiang, et al. Wind-induced responses and life prediction analysis of transmission line in service[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 200-209.
- [31] 机械工程手册编委会. 机械工程手册 第2卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [32] THOMSON, W. T., DAHLEH, M. D. Theory of vibration with applications [M]. Prentice Hall, 1998.
- [33] 中国电力科学研究院. 高压电力设备风致振动控制技术指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [34] 中国电力科学研究院. 特高压设备减振技术研究年度报告[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2022.
- [35] 向异, 金吉良, 赵鑫, 等. 基于统计学特征的西北电网新能源资源特性分析[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 120-127.
- XIANG Yi, JIN Jiliang, ZHAO Xin, et al. Analysis of new energy resources characteristics of northwest power grid based on statistical characteristics[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 120-127.
- [36] 宋山茂, 王瑞骏, 李占海, 等. 西北盐渍土地区光伏支架混凝土修复界面耐久性研究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(9): 141-147.
- SONG Shanmao, WANG Ruijun, LI Zhanhai, et al. A study on durability of the concrete repair interface of the photovoltaic bracket in the saline soil area of Northwest China [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(9): 141-147.
- [37] 电力设备抗震设计规范: GB 50260—2013 [S]. 2013.
- Code for seismic design of electrical installations: GB 50260—2013 [S]. 2013.
- [38] 中国电力科学研究院. 变电站设备风振控制技术导则[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2022.
- [39] 马晓伟, 王文倬, 薛晨, 等. 西北新型电力系统先行示范体系探究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 1-7.
- MA Xiaowei, WANG Wenzhuo, XUE Chen, et al. Research on the leading demonstration system of new-type power system in Northwest China [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 1-7.

作者简介:

张友安(1987—), 男, 工程师, 主要从事电力电容器无功补偿设计研发工作。E-mail: 357428810@qq.com。

王希(1992—), 女, 工程师, 主要从事电力电容器无功补偿设计研发工作。

张成成(1986—), 女, 工程师, 主要从事电力电容器无功补偿设计及市场管理工作。

魏春茹(1999—), 女, 助理工程师, 主要从事电力电容器无功补偿设计及产品工艺工作。