

# 海上风电低频主变压器特性分析及技术展望

阳熹, 汤翔, 李炬添, 陆莹, 陈滢<sup>✉</sup>

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** [目的] 低频交流输电技术已受到广泛关注, 虽然其理论研究在不断深入, 但距离其在大容量远距离的海上风电送出场景下的工程实现还有许多问题亟待解决, 海上低频主变压器的研发与选型问题就是其中之一。[方法] 在详细阐述海上风电低频交流输电系统的结构及工作原理的基础上, 分析了海上主变压器的低频运行特性。[结果] 若采用增加铁心截面及绕组匝数的常规改造方式, 低频变压器在重量体积和总损耗方面均会有所增加, 会给海上风电整体送出方案经济性、海上升压站荷载及布置带来极大影响。需要研究海上低频变压器的小型化、轻量化和低损化设计。[结论] 最终详述了海上低频变压器改造的关键技术。在铁心改造方面, 研发高磁密、低损耗的高性能取向硅钢片是备受关注的低频变压器改造技术。利用海上优势, 设计水冷冷却方式及智能监控的变压器冷却方式也可以实现变压器整体质量与体积的优化。酯类高燃点油变压器具有油可降解、难燃、可靠性较高等优点, 与常规矿物油变压器相比更适用做海上低频变压器。展望上述关键技术的未来发展, 为大容量、高电压等级海上低频变压器的研制与应用提供参考, 以推动大容量远距离海上风电低频送出技术的工程实践。

**关键词:** 低频交流输电; 海上风电; 海上低频变压器; 小型化; 硅钢片; 冷却; 酯类高燃点绝缘油

**中图分类号:** TK89; TM402

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2023)05-0139-10

**开放科学(资源服务)二维码:**



## Characteristics Analysis and Technical Prospect of Low-Frequency Main Transformer for Offshore Wind Power

YANG Xi, TANG Xiang, LI Jutian, LU Ying, CHEN Ying<sup>✉</sup>

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] Low-frequency alternating current power transmission technology has attracted wide attention. Although its theoretical research continues to go deeper, there are still many problems to be solved before its engineering implementation in large-capacity long-distance offshore wind power transmission scenarios. The development and selection of offshore low-frequency main transformer is one of such problems. [Method] Based on the detailed description of the structure and working principle of the low-frequency alternating current transmission system for offshore wind power, the low-frequency operation characteristics of the offshore main transformer were analyzed. [Result] If the transformer is transformed by increasing the core section and winding turns, the weight, volume and total loss of the low-frequency transformer will be increased greatly, which will have a great impact on the economy of the overall transmission scheme of offshore wind power and the load and layout of offshore step-up station. It is necessary to study the miniaturization, light weight and low loss design of offshore low-frequency transformer. [Conclusion] The key transformation technologies of offshore low-frequency transformer are discussed in detail. In the aspect of transformer core, the research and development of high-performance oriented silicon steel sheet with high magnetic density or low loss is the most concerned low-frequency transformer transformation technology. With the offshore advantages, the design of water cooling mode and intelligently monitored transformer cooling mode can also optimize the overall quality and volume of transformer. Ester high ignition point insulated oil transformer has the advantages of biodegradability, inflammability and high reliability of oil, which means that it is more suitable for offshore low-frequency transformer compared with the conventional mineral oil transformer. The future development of the above key technologies is expected to provide reference for the development and application of large-capacity and high-voltage class offshore low-

收稿日期: 2022-02-06 修回日期: 2022-04-05

基金项目: 中国能建广东院科技项目“近海深水区大容量风电场电气解决方案研究”(EV05011W)

frequency transformer, so as to promote the engineering practice of low-frequency technology in the field of large-capacity long-range offshore wind power transmission.

**Key words:** low-frequency alternating current power transmission; offshore wind power; offshore low-frequency transformer; miniaturization; silicon steel sheet; cooling; ester high ignition point insulated oil

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

随着化石能源的日渐枯竭及全球环境与气候的逐步恶化,我国政府提出了“碳达峰、碳中和”的“双碳”目标。为科学有序地推进“双碳”目标达成,能源结构低碳化转型已是大势所趋,新能源的开发与利用已成为重要的发展方向。海上风力发电具有发电利用小时数高、不占用土地资源且环境影响小等优势,已成为我国可再生能源发电领域发展的重要组成部分。近年来,我国海上风电装机迅速提升,截至 2021 年底,我国海风累计装机容量约为 26.38 GW,跃居世界第一。大批海上风电场规划投产导致近海海域资源日益紧张。然而,中国气象局公布的数据表明,我国近海和深远海风能资源开发潜力可达约 2.25 TW。我国深远海蕴涵巨大的风能资源有待挖掘,海上风电向深远海发展是未来的重要方向。国家发改委印发的《“十四五”现代能源体系规划》也指出,要推进海上风电向深远海岸区域布局。

深远海域一般指的是离岸距离大于 100 km,水深超过 50 m 的海域<sup>[1]</sup>。深远海海上风电场必然能实现规模化、集群化建设和高发电利用小时数的电能送出<sup>[2-3]</sup>。目前,德、英等发达国家已经率先实现深远海海上风电场的建设与投运,如距岸 112 km、装机容量 400 MW 的德国 Global Tech I 海上风电场和距岸 120 km、装机容量 1.218 GW 的英国 Hornsea Project One 海上风电场<sup>[4-5]</sup>。目前,我国在深远海风电工程还处于起步阶段,制约其发展的主要原因是大容量风电远距离传输与并网问题尚未妥善解决。

目前,被大家广泛关注的深远海风电送出技术主要有 3 种,分别是:高压交流送出(High Voltage Alternating Current, HVAC)、高压直流送出(High Voltage Direct Current, HVDC)以及低频交流输电(Low Frequency Alternating Current, LFAC)技术<sup>[6-7]</sup>。其中,HVAC 和 HVDC 已被广泛应用于海上风电送出场景,但都存在一些技术缺陷:HVAC 技术受到远

距离海缆传输极限的限制,HVDC 技术存在故障电流开关难的问题。因此,有学者指出,借鉴直流输电频率变化思路、借助交流输电零点断开优势的 LFAC 技术(Fractional Frequency Transmission System, FFTS, 又称为分频输电技术)或许能为大规模深远海风电并网提供更为经济、有效的方案。柔性低频交流输电技术是一种新型高效的交流输电技术,借助电力电子技术灵活选择在 0~50 Hz 合适频率,以提升电网输送容量和柔性调控能力。

随着电力电子技术的逐步成熟,LFAC 技术的理论研究与应用有了飞速发展。理论研究方面,国内外学者开展了大量关于变频器拓扑结构与控制策略<sup>[8-10]</sup>、稳定性分析<sup>[11]</sup>、振荡分析<sup>[12]</sup>、谐波抑制<sup>[13]</sup>、典型场景应用分析等工作。在海上风电大容量远距离送出场景下,学者们多聚焦于经济性概算评估<sup>[14]</sup>、系统初步构建<sup>[15]</sup>、电缆低频特性与增容分析<sup>[16]</sup>等方向。工程应用方面,目前关键设备的开发以及成熟的低频工程设计与运行研究都处于初级阶段。国内建设了一些低频输电示范项目,包括建设中的面向城市电网的浙江杭州 220 kV 中埠—亭山柔性低频输电示范项目<sup>[17]</sup>、已经投产的面向低频风机并网的国家电网浙江台州 35 kV 柔性低频输电示范工程。然而 LFAC 技术在海上风电大容量远距离送出场景下的工程应用还存在诸多障碍。低频、高电压等级和大容量无疑给变频器、海缆、断路器、主变压器等设备的研发与选型带来了难度。

海上低频主变压器作为海上风电低频送出系统中的关键设备,其低频特性、运行的安全性和经济性都是需要重点关注的方面。目前尚无文献就海上低频主变压器展开深入研究。因此,文章将结合目前低频交流输电技术在深远海海上风电送出典型场景的应用,聚焦海上低频主变压器的低频特性分析,梳理并总结目前制约海上低频主变压器研制的关键问题,重点对大容量高电压等级的海上变压器低频改造技术发展方向进行总结与展望。

# 1 远距离大容量海上风电低频交流输电系统

## 1.1 低频交流输电技术

1994 年, 西安交通大学王锡凡院士提出了 50/3 Hz 的分频输电技术, 通过倍频变压器实现低速水轮机接入工频电网, 以解决远距离、大功率低频电力送出问题<sup>[18]</sup>。

实现频率变换是 LFAC 技术的核心环节, 20 年以来, 国内外学者提出了多种变频方式。早期, 以倍频变压器、同步变频器<sup>[19]</sup>为代表的铁磁、旋转变频

方式是主流研究方向。该类变频方式虽然结构简单、造价较低, 但效率低、谐波含量大、难以实现大规模功率变换等问题严重限制了其发展应用。因此, 学者们逐渐转向研究以电力电子器件为核心的变频器, 包括基于半控型晶闸管构成的周波变换器<sup>[20]</sup>和交交变频器<sup>[21]</sup>。这些以半控型器件为核心的变频器普遍存在换相失败、动态响应慢、需要无功补偿等问题。基于全控器件的模块化多电平矩阵换流器 (Modular Multilevel Matrix Converter, M3C) 具有低能量存储、高能量密度的特点, 是近来的研究热点, 其具体拓扑结构如图 1 所示。

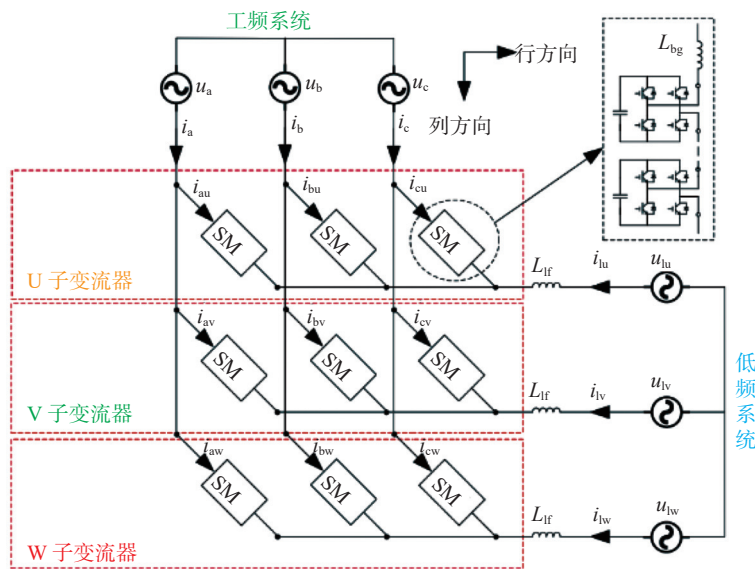


图 1 M3C 电路基本拓扑

Fig. 1 Basic topology of M3C circuit

M3C 共有 9 个桥臂, 两侧分别连接工频系统和低频系统, 适用于大功率高电压等级的变频场景。M3C 虽然控制逻辑较为复杂, 但是能实现两侧有功无功解耦控制, 具备黑启动能力和较强的故障穿越能力。同时, 大量子模块组合和灵活的开关模式能

大幅降低谐波含量, 实现多电平输出。

## 1.2 海上风电低频交流输电系统

海上风电低频交流输电系统拓扑图如图 2 所示。海上风机发出低频电力进行汇集到海上升压站平台, 经过海上低频主变压器升压, 再通过低频海缆远距

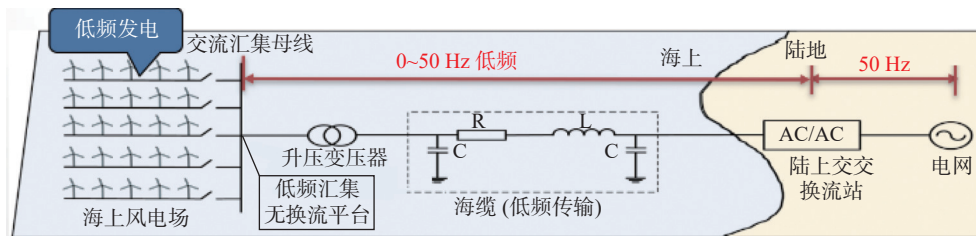


图 2 海上风电低频交流输电系统拓扑图

Fig. 2 Topology of low-frequency alternating current transmission system for offshore wind power

离输送到陆上交流站,陆上变频器再将低频电能转换为工频接入电网。

若忽略海缆电阻,根据线路静态稳定极限功率传输公式(1)和线路电压降落公式(2),当线路频率 $f$ 下降时,线路电抗 $X$ 成正比下降,理论上线路静态稳定有功传输极限 $P_{\max}$ 成反比上升,同时线路的电压降落也有所降低。

$$P_{\max} = \frac{U^2}{X} = \frac{U^2}{2\pi fL} \quad (1)$$

$$\Delta U\% = \frac{QX}{U^2} \times 100 \quad (2)$$

式中:

$P_{\max}$  ——线路静态稳定有功传输极限(W);

$U$  ——系统线电压(V);

$X$  ——线路感抗( $\Omega$ );

$f$  ——系统频率(Hz);

$L$  ——线路电感(H);

$\Delta U\%$  ——系统线电压、线路电压降百分数;

$Q$  ——线路无功功率(Var)。

实际上,电缆特别是长距离海底电缆,由于容升效应,其传输容量直接受到电缆的充电功率限制,因而远低于静态稳定有功传输极限 $P_{\max}$ 。根据式(3)和式(4),理论上频率 $f$ 下降时,电缆充电无功功率 $Q_C$ 成正比下降,使得电缆可用于传输的有功功率 $P$ 提升。

$$Q_C = U^2 X_C = 2\pi f C l U^2 \quad (3)$$

$$P = \sqrt{S_N^2 - Q_C^2} \quad (4)$$

式中:

$X_C$  ——海缆容抗( $\Omega$ );

$C$  ——单位长度下的电容值(F/km);

$l$  ——电缆长度(km);

$S_N$  ——电缆额定视在功率(VA)。

除去低频传输能够提升海缆电能传输距离这一特性外,LFAC技术在海上风电送出场景下的应用还有如下优势:

1)大功率海上风机主要采用直驱/半直驱风机,变频器可灵活改变输出频率,不需要改动风机侧变频器本体。

2)在中长距离海上风电送出应用场景下,由于低频送出使得海缆无功充电功率的降低,与HVAC

技术相比,采用LFAC技术能减少甚至取消海上无功补偿装置的配置。

3)LFAC技术不需要进行海上变频,无海上换流平台,低频海上升压站与工频升压站相当。因此在一定输送距离范围内,采用LFAC的技术经济性能高于HVDC技术。

黄明煌等<sup>[1]</sup>从技术性和经济性的角度分析HVAC、HVDC和LFAC技术在海上风电送出场景下的适用性,以400MW风电场为例,各技术的经济适用区间划分如图3所示。

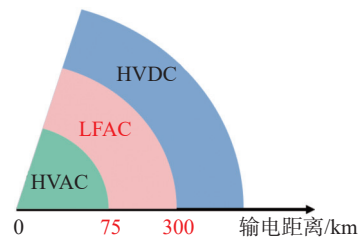


图3 海上风电场景下3种输电技术经济适用区间  
Fig. 3 Economic application range of three transmission technologies in offshore wind power scenario

## 2 变压器低频特性分析

海上低频主变压器是海上风电低频交流输电系统的关键设备之一。LFAC技术仍属于交流输电范畴,研究海上低频变压器,可以先从研究交流变压器的低频特性着手。

### 2.1 变压器工作原理

变压器是由原边绕组、副边绕组和铁心(磁芯)构成的能够改变交流电压的装置。其工作原理是基于电磁感应现象,即在变压器原边绕组通上交变的电流后,变压器铁心感应产生主磁通,进一步在主磁通交链的原边绕组和副边绕组都感应出主电动势,通过两侧绕组的匝数不同实现不同电压等级的变换及功率传输。变压器的感应电动势 $E$ 如式(5)。

$$E \approx 4.44fN\Phi_m \approx 4.44fNB_{\text{sat}}A_{\text{core}} \quad (5)$$

式中:

$E$  ——变压器的感应电动势(V);

$N$  ——变压器绕组匝数(匝);

$\Phi_m$  ——绕组内磁通量(Wb);

$B_{\text{sat}}$  ——铁心中的磁通密度(T);

$A_{\text{core}}$  ——变压器铁心有效截面积( $\text{m}^2$ )。



## 2.2 低频运行对变压器重量与体积的影响

变压器本体结构导致其重量和体积的决定性因素是铁心截面 $A_{\text{core}}$ 和绕组匝数 $N$ 。根据变压器感应电动势 $E$ 的公式(5)可知,若要求变压器的额定电压 $U_1$ 不变,也就是变压器感应电动势 $E$ 不变,变压器运行的频率 $f$ 降低时,必然要求绕组匝数 $N$ 、绕组内磁通量 $\Phi_m$ 增加或者两者均增加。进一步地,交流变压器铁心截面 $A_{\text{core}}$ 与变压器容量的设计经验公式为:

$$A_{\text{core}} \approx K_A \sqrt[3]{P'} \approx \sqrt[3]{\frac{2.52\phi_k \rho k}{f B_{\text{sat}}^2 H_k U_x \times 10^{-5}}} \sqrt[3]{P'} \quad (6)$$

式中:

$K_A$  —— 变压器铁心截面设计经验系数;

$P'$  —— 额定工况下每柱的容量(W);

$\phi_k$  —— 等效漏磁通(Wb);

$\rho$  —— 罗氏系数;

$k$  —— 横向漏磁通导致的附加电抗系数;

$H_k$  —— 绕组平均电抗( $\Omega$ );

$U_x$  —— 电抗压降百分数(%)。

根据经验公式(6)可知,  $A_{\text{core}} \propto 1/\sqrt[3]{f}$ , 也就是说,在其他条件不变的情况下,交流变压器铁心截面 $A_{\text{core}}$ 与频率的平方成反比。

因此,在对变压器进行低频化改造时,常规思路有以下两种:

- 1) 增大铁心的有效截面积 $A_{\text{core}}$ ;
- 2) 增加绕组匝数 $N$ 。

显然无论采取上述哪种方式对变压器进行低频化改造,都会使得变压器的质量和体积增加。特别是频率下降到 20 Hz 之后,变压器的质量、体积都将大幅提升。以 1 GW 风电场配置 2 台的 220 kV, 550/275-275 MVA 分裂双绕组变压器(全穿越阻抗电压 14%、半穿越阻抗 26%)为例。若不进行额外的优化措施,单台变压器重量与体积与频率的关系如图 4 所示。20 Hz 的低频变压器的重量为 870 t 左右,是同等电气参数工频变压器的 1.7 倍,体积则是 1.5 倍。

## 2.3 低频运行对变压器损耗的影响

变压器损耗也是影响远距离大容量海上风电低频交流送出方案的一个关键因素。变压器的损耗主要是由空载损耗(铁损)和负载损耗(铜损)两部分组成。空载损耗是由铁心材料的磁滞和涡流现象产生的,铁心损耗密度 $P_v$ 可以用 Steinmetz 经验公式<sup>[22]</sup>简

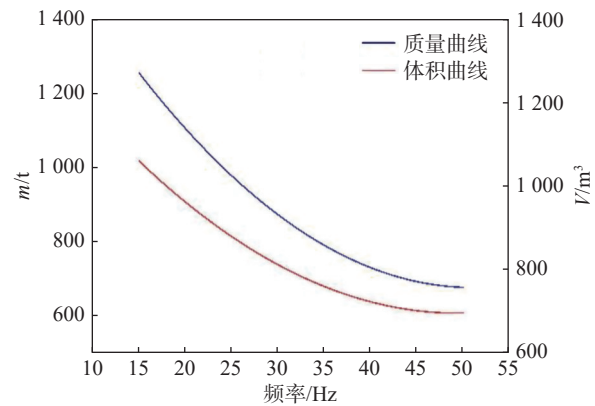


图 4 变压器重量、体积与频率之间的关系(以 220 kV, 550/275-275 MVA 分裂双绕组变压器为例)

Fig. 4 Relationship between weight, volume and frequency of transformer (taking 220 kV, 550/275-275 MVA split double-winding transformer as an example)

要表示为:

$$P_v \approx k_h f B_{\text{sat}}^\alpha + k_e f^2 B_{\text{sat}}^2 \quad (7)$$

式中:

$P_v$  —— 铁心损耗密度(W/mm<sup>2</sup>);

$k_h$  —— 磁滞效应系数,其值与材料有关;

$k_e$  —— 涡流效应系数,其值与材料有关;

$B_{\text{sat}}$  —— 铁心中的磁通密度(T);

$\alpha$  —— Steinmetz 公式的经验参数,其值与材料有关。

根据公式(7)可知,铁心材料的磁滞损耗密度与频率成正比,铁心材料的涡流损耗密度与频率的平方成正比。在低频运行情况下,变压器的铁损密度呈指数下降。

变压器的铜损是指基本损耗和附加损耗。其中,由于基本损耗主要是由绕组的直流电阻决定,因此频率变化几乎不引起其数值变化。附加损耗是由漏磁通在绕组内产生的涡流 $k_a$ 引起的,如式(8)所示。显然,当绕组相关参数不发生变化时,其附加损耗与频率的平方成正比,频率降低会使得附加损耗也随之下降。

$$k_a = \frac{17.8^2 \pi^2 \times 10^{-9}}{18 \rho_r^2} \left( \frac{f m b \alpha A \rho}{H_k} \right)^2 \quad (8)$$

式中:

$k_a$  —— 附加损耗(W);

$\rho_r$  —— 绕组导线的电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}^{-1}$ );

$m$  —— 绕组导线的单根净截面(mm<sup>2</sup>);

$H_k$ 、 $\rho$ ——经验公式计算系数。

通过上述理论分析可知,在变压器铁心和绕组参数恒定不变的情况下,变压器的空载损耗和负载损耗均能随频率下降而降低。然而为保持额定电压不变,变压器低频化改造势必需要增大铁心截面或增大绕组匝数,因此总体的负载损耗会随之增大。且变压器负载损耗要远高于空载损耗,因而在同一设计磁密下,低频变压器的总损耗要高于工频变压器。赵国亮等<sup>[23]</sup>指出,20 Hz 220 kV/180 MVA 变压器(短路阻抗 14%)的空载损耗较工频降低 57%,负载损耗则较工频增加 61%。

### 3 海上主变压器低频化改造的关键技术研究及展望

由前文分析可知,对交流变压器的低频化改造的常规思路就是增大铁心的有效截面积和增加绕组匝数,虽然给变压器的质量和体积带来了大幅增长,但对变压器整体的生产制造影响不大。目前,国内的浙江杭州 220 kV 中埠-亭山柔性低频输电示范项目和浙江台州 35 kV 柔性低频输电示范工程都验证了变压器采用常规思路进行低频化改造的可行性。然而,对于大容量高电压等级的低频海上主变压器而言,质量、体积及损耗的增加都会给整体海上风电低频送出方案经济性、海上升压站布置、变压器运输方案等带来巨大挑战。因此,需要从海上低频变压器小型化、轻量化设计和降损设计这两个角度对海上主变压器低频化改造的关键技术开展进一步的研究。

#### 3.1 高性能取向硅钢作为铁心材料

由式(5)变压器的感应电动势 $E$ 可知,频率降低时,除了增大变压器绕组匝数 $N$ 、铁心有效截面积 $A_{\text{core}}$ 这两种带来变压器体积和重量增加的方案,提升铁心中的磁通密度 $B_{\text{sat}}$ 也可以实现变压器的额定电压不发生改变。为实现低频变压器优化设计,学者们纷纷展开低频变压器铁心用取向硅钢的低频电磁特性研究。

目前制造大型电力变压器铁心选取的是高磁感( $B_m \geq 1.88 \text{ T}$ )取向硅钢片。考虑到大容量高电压等级海上低频主变压器存在的重量、体积问题已成为海上风电低频送出工程应用的关键问题,其中一个低频变压器小型化、轻量化改造的方式是未来通过

开发应用超高磁感( $B_m \geq 1.95 \text{ T}$ )取向硅钢片,以达到提高铁心设计磁密的目的<sup>[24]</sup>。然而,若采用超高磁感( $B_m \geq 1.95 \text{ T}$ )取向的硅钢片,变压器造价将会提高。未来实际工程应用时,需要综合考虑采用超高磁感取向的硅钢片后带来的造价提升和变压器总质量质量的降低这两方面来最终确定海上低频变压器硅钢片的选型。

此外,虽然低频条件下变压器的铁心损耗已经要低于工频条件下,但仍然可以考虑在一定范围内减小硅钢片的厚度来进一步降低铁损。程灵<sup>[25]</sup>指出,低频条件下,0.18~0.30 mm 取向硅钢片的铁损随着硅钢片厚度下降而下降,18QH065 牌号(0.18 mm 薄规格极低损耗取向)硅钢片在 20 Hz 下有最低铁损优势, $P_{1.7/20} = 0.188 \text{ W/kg}$ ,仅为工频铁损的 29.7% 左右。

#### 3.2 合适的冷却方式

若要实现海上低频主变压器小型化、轻量化改造,除去对变压器本体优化的方式外,设计合适的变压器冷却方式,降低变压器冷却设备的体积和重量,也不失为一种可行的思路。

变压器常见的冷却方式可以分为以下几类:油浸自冷/风冷式(ONAN/ONAF)、油浸强迫油循环风冷/水冷式(OFAF/OFWF)、强迫油循环导向风冷/水冷式(ODAF/ODWF)。其中,目前海上工频主变压器的主流冷却方式为油浸自冷式(ONAN),即绕组浸在变压器油中,依靠变压器油的自然热循环将热量带到油管或散热片,通过油管或散热片与外界自然通风冷却。其原因是海上升压站长期无人值守,通过散热片自然散热的可靠性与经济性均要高于设置循环水冷却器的水冷方式或冷却风机的风冷方式。特别是在同一设计磁密下,低频变压器较工频情况下总损耗更大,温升更严酷,必然导致散热需求增加,冷却设备的体积和重量增加。若低频变压器仍采用油浸自冷式,需要更多的散热片,该部分的体积和重量有所增加。

对于变压器冷却方式的改造主要有 2 个思路。首先是可以考虑取消散热片,利用海上取水便捷的特点,将选用油浸强迫油循环水冷式(OFWF)冷却,同时优化冷却水系统的布置,使得变压器与冷却装置整体的体积和重量减小。赵云等<sup>[26]</sup>提出了在海上升压站的主变水冷系统采用闭式循环水冷系统,将

换热器置于海水中,并从安全性、冷却效果、可靠性、运行维护、经济性和设备防腐几个方面将该方案和传统的开环水冷系统进行对比,验证了所提方案的可行性与优越性。再者,可以通过设计变压器冷却系统检测与智能控制结合的方案对变压器冷却系统优化。结合可编程逻辑控制器智能控制技术,戴鹏<sup>[27]</sup>研究了冷却方式对变压器损耗的影响,设计了变压器智能冷却与经济运行综合控制装置,实现了变压器低损耗经济运行与冷却系统的减配。

### 3.3 酯类高燃点绝缘油变压器

油浸式变压器中的绝缘油的主要作用是绝缘和散热,按照基础油的种类可以将其分为4大类,分别是矿物油、硅油、合成酯和天然酯(俗称植物油)。将矿物油作为变压器绝缘油的技术成熟,已被广泛应用。其中#10、#25和#45油都是变压器行业常用的矿物绝缘油。硅油早期是为了替代有毒的多氯联苯(PCB)被用于有宽温域要求的变压器上,但价格昂贵、粘度系数高等缺点限制了其被推广使用。合成酯和天然酯的基本成分都是酯类有机物,他们的燃点都高于300℃,因此也被归类为高燃点绝缘油。

随着酯类高燃点绝缘油研制与应用技术的不断发展,酯类高燃点绝缘油变压器已被认为是一种新型安全环保的变压器。与常规的矿物绝缘油变压器相比,酯类高燃点绝缘油变压器能更适用于远距离大容量海上风电低频送出场景的原因有以下几点:

1)从防火性能方面来看,高燃点绝缘油的闪点超过275℃,且饱和蒸汽气压较低,因此其引燃难度远低于矿物油。同时高燃点绝缘油的粘度较高,降低火灾扩散的能力,有利于火灾得到控制。据美国消防协会公布的统计数据来看,全球有不少于15万应用FR3绝缘油(一类植物绝缘油)的变压器在10余年间均未发生火灾事故<sup>[28]</sup>。西门子的研究人员表示,利用酯类高燃点绝缘油替代矿物油,能够减免部分消防设备<sup>[29]</sup>。因此,若在海上使用高燃点绝缘油变压器,可以尝试对海上升压站平台消防系统减配,减轻低频变压器体积重量大给升压站平台布置带来的问题。

2)从安全距离方面来看,由于酯类高燃点绝缘油的难燃特性,上海市发布的《10kV预装式变电站应用设计规范》规定了高燃点绝缘油变压器在建筑

物耐火等级下间距要求方面,与干式变压器相同,小于普通矿物油变压器的距离要求<sup>[30]</sup>。因此,酯类高燃点绝缘油变压器能节省空间,更适用于海上升压平台。

3)从大型电力变压器研制方面来看,目前研究表明,相较传统矿物油变压器,酯类高燃点绝缘油变压器能够节约3%的变压器制造材料和15%的液体绝缘油<sup>[31]</sup>。因此,在海上低频变压器若使用酯类绝缘油,能够实现变压器自身的轻量化与小型化。同时植物绝缘油也能提升绝缘纸的寿命,使其达到在矿物油中寿命的8倍,更加契合海上变压器对可靠性的高要求。

4)从环保性能方面来看,学者通过实验测量得到植物绝缘油RDB、植物绝缘油FR3和矿物油#25的微生物降解率分别为98.87%、99.57%和37.73%<sup>[32]</sup>。《新化学物质危害评估导则》(HJ/T 154—2004)判定RDB、FR3属于易生物降解的化学物质,而#25变压器油则被归类为难生物降解的化学物质。其原因主要在于植物绝缘油主要构成是甘三酯,容易发生水解反应,而矿物油主要由难水解的烷烃构成。高燃点绝缘油的环保特性使得其泄露不会造成生态风险,更适用于海上。若未来政策允许将可降解的高燃点绝缘油直接排放到海洋,还可以进一步考虑取消变压器事故油池的设置。

## 4 结论

近年来,低频交流输电技术的理论研究与应用有了飞速发展。然而,低频交流输电技术在远距离大容量海上风电送出场景下的工程应用还存在诸多障碍。低频、高电压等级和大容量给海上主变压器的研发与选型带来了难度。若只采用增加铁心截面和绕组匝数来改造变压器的常规思路,将使得海上低频主变压器的重量和体积大幅增长,给海上升压站荷载与布置,整体海上风电低频送出方案的经济性都带来巨大挑战。同时,低频运行给变压器带来的总损耗增加也值得关注。因此,文章分析总结并展望了以下3个海上主变压器低频化改造的关键技术。

1)研发高性能取向硅钢作为铁心材料,主要思路包括开发应用能够提高铁心设计磁密的超高磁感( $B_m \geq 1.95$  T)取向硅钢片和优化硅钢片的厚度来进一步降低铁损。



2) 变压器冷却方式对变压器的重量和体积也有着极大影响。可以通过考虑取消散热片, 水冷(OFWF)冷却方式, 同时优化冷却水系统的布置, 使得变压器与冷却装置整体的体积和重量减小。此外, 设计智能检测与控制的变压器冷却系统以实现降损和变压器冷却器减配, 也是值得研究的方向。

3) 酯类高燃点油变压器具有优越的防火性能与环保性能, 同时其安全距离要求低于普通矿物油变压器。在布置紧凑、需要尽可能提高运行可靠性和尽可能降低海上平台体积的场景下, 选择酯类高燃点油变压器作为海上低频变压器的方案将更为适用。

相信随着上述技术研究的逐步深入, 高电压等级、大容量变压器的制造、安装及工程应用的问题将得到妥善解决, 低频交流输电技术也将在大容量远距离海上风电送出场景下的工程实现得到更快发展。

#### 参考文献:

- [1] 黄明煌, 王秀丽, 刘沈全, 等. 分频输电应用于深远海风电并网的技术经济性分析 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(5): 167-174. DOI: 10.7500/AEPS20180725005.
- HUANG M H, WANG X L, LIU S Q, et al. Technical and economic analysis on fractional frequency transmission system for integration of long-distance offshore wind farm [J]. *Automation of electric power systems*, 2019, 43(5): 167-174. DOI: 10.7500/AEPS20180725005.
- [2] Global Wind Energy Council. GWEC global wind statistics 2017 [EB/OL]. (2018-12-06) [2023-03-29]. <http://gwec.net/wp-content/uploads/2018/04/offshore.pdf>.
- [3] 夏云峰. 2017年欧洲海上风电新增并网容量3 148 MW [J]. *风能*, 2018(2): 38-43. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2018.02.009.
- XIA Y F. The newly connected capacity of European offshore wind power in 2017 was 3 148 MW [J]. *Wind energy*, 2018(2): 38-43. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2018.02.009.
- [4] Wind Europe. Offshore wind in Europe key trends and statistics 2017 [EB/OL]. (2018-07-18) [2023-03-29]. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Offshore-Statistics-2017.pdf>.
- [5] 姜楠. 深海风力发电技术的发展现状与前景分析 [J]. *新能源进展*, 2015, 3(1): 21-24. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2015.01.004.
- JIANG N. Analysis on status and prospect of wind power generation in deep sea [J]. *Advances in new and renewable energy*, 2015, 3(1): 21-24. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2015.01.004.
- [6] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(14): 3758-3770. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.152756.
- CHI Y N, LIANG W, ZHANG Z K, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(14): 3758-3770. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.152756.
- [7] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与输送方案比较 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(31): 5459-5466. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.31.001.
- WANG X F, WEI X H, NING L H, et al. Integration techniques and transmission schemes for off-shore wind farms [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(31): 5459-5466. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.31.001.
- [8] 徐政, 张哲任. 低频输电技术原理之一——M<sup>3</sup>C的数学模型与等效电路 [J]. *浙江电力*, 2021, 40(10): 13-21. DOI: 10.19585/j.zjdl.202110002.
- XU Z, ZHANG Z R. Principles of low frequency power transmission technology: part 1- mathematical model and equivalent circuit of M<sup>3</sup>C [J]. *Zhejiang electric power*, 2021, 40(10): 13-21. DOI: 10.19585/j.zjdl.202110002.
- [9] 吴小丹, 朱海勇, 董云龙, 等. 面向柔性低频输电的模块化多电平矩阵变换器分频分层控制 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(18): 131-140. DOI: 10.7500/AEPS20201222003.
- WU X D, ZHU H Y, DONG Y L, et al. Frequency-division and hierarchical control of modular multilevel matrix converter for flexible low-frequency transmission [J]. *Automation of electric power systems*, 2021, 45(18): 131-140. DOI: 10.7500/AEPS20201222003.
- [10] 徐政, 张哲任. 低频输电技术原理之三——M<sup>3</sup>C基本控制策略与子模块电压平衡控制 [J]. *浙江电力*, 2021, 40(10): 30-41. DOI: 10.19585/j.zjdl.202110004.
- XU Z, ZHANG Z R. Principles of low frequency power transmission technology: part 3-basic control strategy for the M<sup>3</sup>C and sub-module voltage balance control [J]. *Zhejiang electric power*, 2021, 40(10): 30-41. DOI: 10.19585/j.zjdl.202110004.
- [11] 宁联辉, 吴再驰, 王锡凡, 等. 基于模块化多电平矩阵式换流器的分频输电系统低频侧阻抗建模及稳定性判别 [J]. *电网技术*, 2022, 46(10): 3720-3729. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.



- 2022.1264.
- NING L H, WU Z C, WANG X F, et al. Low-frequency side impedance modeling and stability discrimination of fractional frequency transmission system based on modular multilevel matrix converter [J]. *Power system technology*, 2022, 46(10): 3720-3729. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1264](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1264).
- [12] 张扬, 林卫星, 邓才波, 等. 柔性直流输电系统低频振荡机理及抑制策略 [J]. *电网技术*, 2021, 45(8): 3134-3144. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0848](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0848).
- ZHANG Y, LIN W X, DENG C B, et al. Low-frequency oscillation mechanism and suppression strategy of flexible HVDC transmission system [J]. *Power system technology*, 2021, 45(8): 3134-3144. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0848](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0848).
- [13] 何秉哲. 多端海上风电低频交流接入协调控制及谐波抑制 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021. DOI: [10.27670/d.cnki.gcqdu.2021.002056](https://doi.org/10.27670/d.cnki.gcqdu.2021.002056).
- HE B Z. Coordinated control and harmonic suppression for low frequency AC access of multi terminal offshore windfarms [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. DOI: [10.27670/d.cnki.Gcqdu.2021.002056](https://doi.org/10.27670/d.cnki.Gcqdu.2021.002056).
- [14] 王锡凡, 刘沈全, 宋卓彦, 等. 分频海上风电系统的技术经济分析 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(3): 43-50. DOI: [10.7500/AEPS20140121007](https://doi.org/10.7500/AEPS20140121007).
- WANG X F, LIU S Q, SONG Z Y, et al. Technical and economical analysis on offshore wind power system integrated via fractional frequency transmission system [J]. *Automation of electric power systems*, 2015, 39(3): 43-50. DOI: [10.7500/AEPS20140121007](https://doi.org/10.7500/AEPS20140121007).
- [15] 王秀丽, 赵勃扬, 黄明煌, 等. 大规模深远海风电送出方式比较及集成设计关键技术研究 [J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(2): 138-145. DOI: [10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2019.02.004](https://doi.org/10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2019.02.004).
- WANG X L, ZHAO B Y, HUANG M H, et al. Research of integration methods comparison and key design technologies for large scale long distance offshore wind power [J]. *Journal of global energy interconnection*, 2019, 2(2): 138-145. DOI: [10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2019.02.004](https://doi.org/10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2019.02.004).
- [16] 宁联辉, 王琦晨, 杨勇, 等. 海底电缆的低频特性分析及仿真研究 [J]. *浙江电力*, 2021, 40(12): 94-102. DOI: [10.19585/j.zjdl.202112013](https://doi.org/10.19585/j.zjdl.202112013).
- NING L H, WANG Q C, YANG Y, et al. Analysis and simulation of low frequency characteristics of submarine cables [J]. *Zhejiang electric power*, 2021, 40(12): 94-102. DOI: [10.19585/j.zjdl.202112013](https://doi.org/10.19585/j.zjdl.202112013).
- [17] 张蕾, 许挺. 世界首个柔性低频输电工程正式落点浙江杭州 [J]. *新能源科技*, 2021(6): 11. DOI: [10.3969/j.issn.2096-8809.2021.06.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-8809.2021.06.009).
- ZHANG L, XU T. The world's first flexible low-frequency transmission project officially landed in Hangzhou, Zhejiang [J]. *New energy science and technology*, 2021(6): 11. DOI: [10.3969/j.issn.2096-8809.2021.06.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-8809.2021.06.009).
- [18] 王锡凡, 王秀丽. 分频输电系统的可行性研究 [J]. *电力系统自动化*, 1995, 19(4): 5-13.
- WANG X F, WANG X L. Feasibility study of fractional division transmission system [J]. *Automation of electric power systems*, 1995, 19(4): 5-13.
- [19] CRARY S B, EASLEY R M. Frequency changers—characteristics, applications, and economics [J]. *Transactions of the American institute of electrical engineers*, 1945, 64(6): 351-358. DOI: [10.1109/t-aiee.1945.5059151](https://doi.org/10.1109/t-aiee.1945.5059151).
- [20] QIN N, YOU S, XU Z, et al. Offshore wind farm connection with low frequency AC transmission technology [C]//2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, Canada, July 26-30, 2009. New York, USA: IEEE, 2009: 1-9. DOI: [10.1109/PES.2009.5275262](https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275262).
- [21] 宁联辉, 王锡凡, 滕予非, 等. 风力发电经分频输电接入系统的实验 [J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(21): 9-16. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.2011.21.004](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2011.21.004).
- NING L H, WANG X F, TENG Y F, et al. Experiment on wind power grid integration via fractional frequency transmission system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(21): 9-16. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.2011.21.004](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2011.21.004).
- [22] BERGLUND R. Frequency dependence of transformer losses [D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2009.
- [23] 赵国亮, 陈维江, 邓占锋, 等. 柔性低频交流输电关键技术及应用 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(15): 1-10. DOI: [10.7500/AEPS20220223007](https://doi.org/10.7500/AEPS20220223007).
- ZHAO G L, CHEN W J, DENG Z F, et al. Key technologies and application of flexible low-frequency AC transmission [J]. *Automation of electric power systems*, 2022, 46(15): 1-10. DOI: [10.7500/AEPS20220223007](https://doi.org/10.7500/AEPS20220223007).
- [24] 程灵, 马光, 韩钰, 等. 薄规格取向硅钢电磁特性及在中低频率电力装备中的应用 [J]. *电工钢*, 2022, 4(4): 1-8.
- CHENG L, MA G, HAN Y, et al. Electromagnetic characteristics of thin-gauge grain-oriented silicon steel and its application in medium and low frequency power equipments [J]. *Electrical steel*, 2022, 4(4): 1-8.
- [25] 程灵. 高性能取向硅钢在电力装备中的应用技术研究 [D]. 北京: 钢铁研究总院, 2021. DOI: [10.27027/d.cnki.ggtey.2021](https://doi.org/10.27027/d.cnki.ggtey.2021).

000007.  
CHENG L. Research on applied technology of high-performance grain-oriented silicon steel in power equipment [D]. Beijing: Central Iron & Steel Research Institute, 2021. DOI: [10.27027/d.cnki.ggtey.2021.000007](https://doi.org/10.27027/d.cnki.ggtey.2021.000007).
- [26] 赵云, 郑明, 郑建伟. 海上升压站主变压器冷却方式选择 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 91-94,100. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.018](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.018).  
ZHAO Y, ZHENG M, ZHENG J W. Selection of main transformer cooling system in offshore substation [J]. *Southern energy construction*, 2015, 2(3): 91-94,100. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.018](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.018).
- [27] 戴鹏. 电力变压器智能冷却与经济运行综合控制研究 [D]. 济南: 山东大学, 2013.  
DAI P. Integrated control of power transformers smart cooling & economic operation [D]. Ji'nan: Shandong University, 2013.
- [28] 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司. VinsOil植物绝缘油 [EB/OL]. (2016-01-20) [2023-04-01]. <http://kjfw.Cec.org.cn/jiandingtongbao/jiandingtongbao/2014-05-08/121420.html>.  
State Grid Electric Power Research Institute Wuhan Nanrui Co., Ltd. VinsOil plant insulating oil [EB/OL]. (2016-01-20) [2023-04-01]. <http://kjfw.Cec.org.cn/jiandingtongbao/jiandingtongbao/2014-05-08/121420.html>.
- [29] 韩金华, 韩筛根, 王思宝, 等. 一种基于高燃点植物绝缘油变压器设计方法 [J]. *变压器*, 2014, 51(8): 38-42. DOI: [10.19487/j.cnki.1001-8425.2014.08.010](https://doi.org/10.19487/j.cnki.1001-8425.2014.08.010).  
HAN J H, HAN S G, WANG S B, et al. Transformer design method based on high ignition point vegetable insulation oil [J]. *Transformer*, 2014, 51(8): 38-42. DOI: [10.19487/j.cnki.1001-8425.2014.08.010](https://doi.org/10.19487/j.cnki.1001-8425.2014.08.010).
- [30] 上海市电力公司, 上海电力设计院有限公司. 10 kV 预装式变电站应用设计规程: DGJ08—99—2003 [S]. 上海: 上海市建设和管理委员会, 2003.  
State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai Electric Power Design Institute Co., Ltd. Shanghai engineering construction code for 10 kV prefabricated substations: DGJ 08—99—2003 [S]. Shanghai: Shanghai Municipal Commission of Construction and Administration, 2003.
- [31] 李剑, 姚舒瀚, 杜斌, 等. 植物绝缘油及其应用研究关键问题分析与展望 [J]. *高电压技术*, 2015, 41(2): 353-363. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.2015.02.001](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.2015.02.001).  
LI J, YAO S H, DU B, et al. Analysis to principle problems and future prospect of research on vegetable insulating oils and their applications [J]. *High voltage engineering*, 2015, 41(2): 353-363. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.2015.02.001](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.2015.02.001).
- [32] 陈江波, 王飞鹏, 蔡胜伟, 等. 变压器植物、矿物绝缘油的微生物降解机制及差异 [J]. *重庆大学学报*, 2018, 41(2): 61-68. DOI: [10.11835/j.issn.1000-582X.2018.02.008](https://doi.org/10.11835/j.issn.1000-582X.2018.02.008).  
CHEN J B, WANG F P, CAI S W, et al. Microbial degradation mechanisms and differences of plant and mineral insulating oil of transformers [J]. *Journal of Chongqing University*, 2018, 41(2): 61-68. DOI: [10.11835/j.issn.1000-582X.2018.02.008](https://doi.org/10.11835/j.issn.1000-582X.2018.02.008).

---

作者简介:



阳熹

阳熹 (第一作者)

1982-, 男, 发输变电注册电气师, 高级工程师, 西安交通大学电气工程专业硕士, 主要从事海上风电新能源利用管理研究工作 (e-mail) yangxi@gedi.com.cn。

汤翔

1983-, 男, 注册电气工程师, 高级工程师, 西安交通大学电气工程硕士, 主要从事海上风电、火电等发电电气技术研究及设计工作 (e-mail) tangxiang@gedi.com.cn。

李炬添

1985-, 男, 武汉大学高电压与绝缘技术专业硕士, 主要从事海上风电技术研究及设计工作 (e-mail) lijutian@gedi.com.cn。

陆莹

1981-, 女, 正高级工程师, 西安交通大学电气工程专业硕士, 主要从事各种新能源、火电厂、核电厂等电气技术研究及设计工作 (e-mail) luying@gedi.com.cn。



陈滢

陈滢 (通信作者)

1997-, 女, 华南理工大学电力电子与电气传动工程专业硕士, 主要从事各种新能源、火电厂等电气技术研究及设计工作 (e-mail) chenying02@gedi.com.cn。

(编辑 孙舒)