

工业应用

定子绝缘系统导热性能对电机温升影响仿真研究

杨金霞, 赵安然, 李强军, 吴江权

(中车株洲所电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001)

摘要: 电机小型化、轻量化和高功率密度的发展趋势, 对电机绝缘系统提出了越来越高的要求。绝缘系统导热性能的提升, 在一定程度上可以提升电机的整体性能。文章基于电机内传热的基本理论, 采用数值方法, 针对不同冷却方式和种类的电机, 分析了定子绝缘系统导热性能对电机各部分温升的影响。结果表明, 定子绝缘系统综合导热性能对电机绕组温升的影响最大, 在实际应用中, 应尽量使定子绝缘系统综合导热系数值处于某一临界值附近。

关键词: 电机; 绝缘系统; 导热系数; 温升

中图分类号: TM303.4

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2017)03-0054-05

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2017.03.010

Simulated Research on the Influence of Thermal Conductivity of Stator Insulation System on Temperature Rise of Electric Motor

YANG Jinxia, ZHAO Anran, LI Qiangjun, WU Jiangquan

(CRRC ZIC Research Institute of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: At present, the development trend of motor, such as downsize, light weight and high power density has put forward higher requirement to its insulation system. The increase of thermal conductivity of insulation system is beneficial to improve the overall performance of motor. Based on the basic theory of heat transfer in the motor and numerical method, this paper analyzed the effect of thermal conductivity of stator insulation system on the temperature rise of the motor. The thermal conductivity of stator insulation system has the greatest influence on the winding temperature rise. In the application, the thermal conductivity of stator insulation system should be as close as possible to a critical value.

Keywords: motor; insulation system; thermal conductivity; temperature rise

0 引言

随着社会和经济的发展以及各行业对节能环保重视程度的提高, 用于轨道交通车辆及城市交通车辆的牵引电机向高功率密度方向发展。电机功率密度的提高会使电机的温升升高, 这对电机定子的绝缘系统提出了越来越高的要求^[1-3], 不仅要求其能够承受较高的电机绕组温度, 而且还要求其具有优良的综合导热性能。

绝缘系统综合导热性能与绝缘材料种类、绝缘结构和实际工艺密切相关。电机定子绝缘系统所用绝缘材料

种类较多, 绝缘材料种类不同, 其自身的导热系数各不相同。作为电机的重要组成部分, 当绝缘等级相同时, 其热稳定性和导热性的提高对电机整体性能提升具有关键的作用^[4]。

为了分析绝缘系统导热性能对电机温升的影响, 本文基于电机三维温度场的数值计算, 选取不同冷却结构和类型的电机, 得到不同绝缘系统综合导热系数下的电机温度场分布, 从而得出绝缘系统导热系数与电机温升的关系。

1 电机内传热的基本方式

1.1 热量传递方式

工程上, 热量传递的基本方式有 3 种, 即导热、对

收稿日期: 2017-01-04

作者简介: 杨金霞 (1982-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事永磁电机设计及电机通风发热计算与研究。

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2015BAG12B01)

流换热和辐射换热^[5]。这3种热量传递方式共同存在,只是在不同的部位和传热环节中起主导地位的传递方式不同而已。

(1) 导热,亦称为热传导,是物体各部分之间不发生相对位移时依靠微观粒子的热运动而产生的热量传递。导热基本定律,由于是由法国数学、物理学家傅里叶提出的,所以也称为傅里叶定律,其数学表达式如式(1)所示,其中符号“-”表示热量传递指向温度降低的方向。

$$\Phi = -\lambda A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

式中: Φ ——单位时间内通过某一给定面积的热量, W; λ ——导热系数,表征材料导热性能的优劣,与温度等因素有关, W/(m·K); A ——垂直于热流方向的面积, m²;

$\frac{\partial T}{\partial x}$ ——物体温度沿 x 方向的变化率。

(2) 对流是指由于流体的宏观运动,致使流体各部分之间发生相对位移、冷热流体相互掺杂而引起的热量传递过程。工程上,人们更关注于对流换热,即流体流过一个物体表面时的热量传递过程。

(3) 辐射换热是一种借助于电磁波传递能量的过程。自然界中,各个物体都不停地向空间发出辐射,同时又不断地吸收其他物体发出的热辐射。辐射与吸收的综合结果造成了以辐射方式进行的物体间的热量传递。

1.2 电机定子绕组传热路径

电机定子结构主要包括定子铁心、定子绕组绝缘系统和定子压圈等。定子铁心一般由硅钢片叠压而成,铁心内圆处开有定子槽,定子线圈嵌入定子槽内构成定子绕组。定子绕组铜耗产生的热量,其散热路径主要包括:

(1) 通过绝缘系统传给定子铁心,再由铁心传给冷却介质。其主导热传递方式为导热,绕组铜与铁心之间的传热热阻为

$$R_{CF} = \frac{\delta_{CF}}{\lambda_{CF} A_{CF}} \quad (2)$$

式中: δ_{CF} ——绕组和铁心之间的绝缘厚度, m; λ_{CF} ——绝缘的综合导热系数, W/(m·K); A_{CF} ——绝缘层和铁心的接触面积, m²。

(2) 从绕组端部表面传给空气。其主导热传递方式亦为导热,绕组端部铜和空气之间的热阻为

$$R_E = \frac{\delta_E}{\lambda_E A_E} + \frac{1}{h_E A_E} \quad (3)$$

式中: δ_E ——绕组端部绝缘厚度, m; λ_E ——绕组端部绝缘的综合导热系数, W/(m·K); A_E ——绕组端部散热面积, m²; h_E ——端部表面传热系数, W/(m²·K)。

(3) 通过定转子之间气隙的对流换热,将热量传递给转子,再由转子带走。其主导热传递方式亦为对流。定转子间气隙热阻为

$$R_{l2} = \frac{\delta_{ag}}{\lambda_{air} Nu A_{si}} \quad (4)$$

式中: δ_{ag} ——气隙长度, m; λ_{air} ——空气的导热系数, W/(m·K); Nu ——努塞尔特准则数; A_{si} ——定子铁心内圆表面的散热面积, m²。

综上可知,定子绝缘系统的综合导热系数值越大,与其相关的热阻值越小,这意味着热量传导的速率越高,且电机绕组温升与 R_{CF} 和 R_E 密切相关。

2 电机定子绝缘系统

当采用成型绕组时,定子绝缘部位主要包括线圈、线圈直线边、线圈斜边与槽部绝缘。成型绕组线圈本身包括导线与匝间绝缘,线圈直线边和线圈斜边主要包括对地绝缘和外包绝缘,所用绝缘材料一般为粉云母带、聚酰亚胺薄膜、无碱玻璃丝带等。槽部绝缘主要包括槽绝缘、槽底垫条、层间绝缘(为单层绕组时,不涉及层间绝缘)、槽楔和调整垫条等,涉及到的绝缘材料主要为复合箔、NOMEX 纸、聚酰亚胺上胶布等材料。

当采用散嵌绕组时,定子绝缘部位主要包括线圈和槽部绝缘。线圈导线本身带有绝缘层,槽部绝缘主要包括槽绝缘、槽楔及层间绝缘等。定子组装完成后,一般会采用 VPI (vacuum pressure impregnating, 真空压力浸漆) 工艺,因此完整的绝缘系统还包括浸渍漆材料。

图 1 给出了定子槽部绝缘结构示意图,其中图 1(a) 示出采用双层成型绕组时常见槽部绝缘结构,图 1(b) 示出采用单层散嵌绕组时槽部绝缘结构。

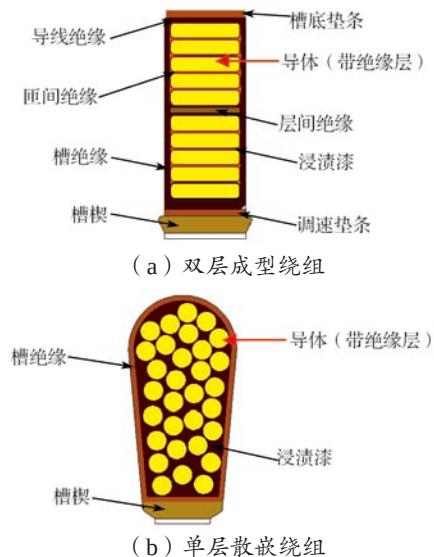


图 1 定子槽部绝缘结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of winding insulation structure of stator slot

电机定子绝缘系统综合导热系数 λ_i 理论上可由式(5)求得^[6]:

$$\lambda_i = \frac{(\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n) \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n}{\delta_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n + \delta_2 \lambda_1 \lambda_3 \dots \lambda_n + \dots + \delta_n \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}} \quad (5)$$

式中: λ_n ——第 n 种材料的导热系数; δ_n ——第 n 种材料的厚度。

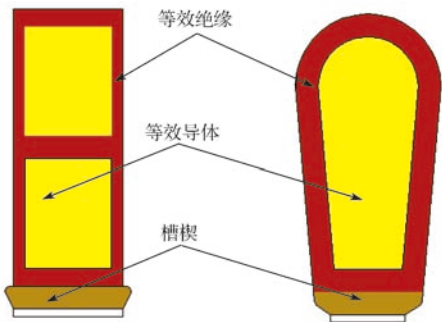
由于各种绝缘材料并非理想均质状态,加之受制造和工艺等不可控因素的影响,不同材料层之间会存在间隙,导致理论计算值与实际值之间可能存在较大的误差。在条件允许的情况下,建议采用相关试验对绝缘系统的综合导热系数值进行测定。

3 绝缘系统导热性能对电机温升的影响

3.1 定子绝缘结构的等效与简化

由于电机各绝缘部位涉及到的材料种类多且各类材料实际厚度很薄(如导线绝缘厚度仅为0.1 mm左右),若完全按照实际模型搭建,一方面会增加求解域物理模型的复杂程度;另一方面受网格剖分的限制,将导致模型无法成功剖分和计算。因此在对电机温度场模型求解时,一般会对绝缘结构进行等效和简化。

搭建模型时,将绝缘部分简化为一个整体,并根据实际绝缘结构,计算绝缘系统的综合导热系数,或者根据试验测量得到。等效方法具体如下^[7]:(1)根据线圈结构得到导体(不含绝缘层)的等效面积,当为双层绕组时,注意上、下层导体面积的一致性;(2)槽型面积(不含槽楔部分)与导体等效面积之差为绝缘部分的等效面积,结合槽型外围周长,计算得到绝缘部分的初始等效厚度;(3)由初始得到的导体等效面积、绝缘等效面积和绝缘厚度,结合具体绕组形式与槽形,调整导体尺寸和绝缘厚度,保证导体及绝缘的等效面积与实际面积的相对误差不大于0.2%。图2给出了不同槽形和不同绕组形式下槽部绝缘的等效模型。



(a) 双层成型绕组 (b) 单层散嵌绕组

图2 槽部绝缘等效模型

Fig. 2 Equivalent models of stator slot insulation

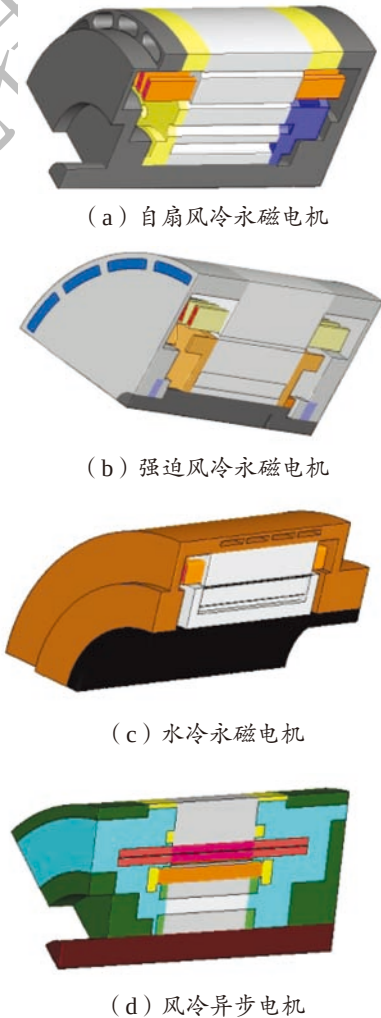
3.2 电机温度场求解模型

基于流固耦合的三维电机温度场模型,对电机的温

度场进行数值计算。在计算的过程中,仅改变绝缘系统的等效综合导热系数值,分析电机定子绕组、定子铁心和转子部位的温度变化情况。电机温度场数值计算基于以下基本假设条件^[8-10]:

- (1) 模型中涉及到的材料与冷却介质各项物性参数不随温度变化;冷却介质均为不可压缩理想流体。
- (2) 各个接触的固体部件紧密接触,忽略其间的接触热阻。
- (3) 求解稳态温度场,各部位的损耗,即热流密度按常数设置;且认为各部位热流密度均布。
- (4) 绕组端部按直线棒处理。
- (5) 旋转部件通过多重旋转坐标系进行模拟。

本文分别以自扇风冷永磁电机、强迫风冷永磁电机、水冷永磁电机和强迫风冷异步电机为研究载体,其三维温度场求解模型如图3所示。



(d) 风冷异步电机

图3 温度场求解域

Fig. 3 Computational domains of 3D temperature field

3.3 计算结果

表1~表4分别给出了上述4款电机在不同绝缘系统综合导热系数值下定子绕组、定子铁心和转子铁心的

温度计算结果。

表 1 自扇风冷永磁电机温度场计算结果

Tab. 1 Calculation results of temperature field of fan-cooled PM motor

综合导热系数值 / $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	定子绕组 / $^{\circ}\text{C}$	定子铁心 / $^{\circ}\text{C}$	转子铁心 / $^{\circ}\text{C}$
0.08	192.1	121.4	142.6
0.1	180.4	121.9	141.1
0.12	172.5	122.3	140.1
0.16	162.2	122.8	138.5
0.18	158.8	123	137.9
0.2	155.8	123.1	137.5
0.25	150.7	123.4	136.5
0.3	147.1	123.5	136
0.4	142.5	123.7	134.7

表 2 强迫风冷永磁电机温度场计算结果

Tab. 2 Calculation results of temperature field of forced air-cooled PM motor

综合导热系数值 / $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	定子绕组 / $^{\circ}\text{C}$	定子铁心 / $^{\circ}\text{C}$	转子铁心 / $^{\circ}\text{C}$
0.08	180.7	127.2	133.5
0.1	171.3	127.6	133.5
0.12	164.6	127.7	133.4
0.16	155.6	127.7	132.8
0.18	152.7	127.8	132.7
0.2	150.3	127.8	132.7
0.25	146.5	127.9	132.6
0.3	143.7	128	132.5
0.4	140	128	132.3

表 3 水冷永磁电机温度场计算结果

Tab. 3 Calculation results of temperature field of water-cooled PM motor

综合导热系数值 / $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	定子绕组 / $^{\circ}\text{C}$	定子铁心 / $^{\circ}\text{C}$	转子铁心 / $^{\circ}\text{C}$
0.08	220.4	92.3	106.4
0.1	202.2	92.4	106
0.12	188.8	92.6	105.7
0.16	170.4	92.8	105.2
0.18	163.8	92.8	104.9
0.2	158.4	92.9	104.8
0.25	148.1	92.9	104.4
0.3	140.8	93	104
0.4	131.2	93	103.5

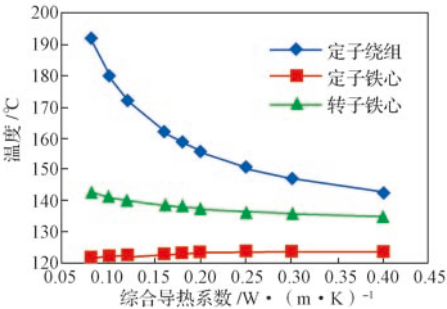
表 4 风冷异步电机温度场计算结果

Tab. 4 Calculation results of temperature field of air-cooled asynchronous motor

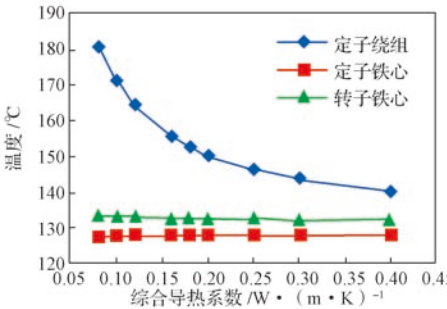
综合导热系数值 / $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	定子绕组 / $^{\circ}\text{C}$	定子铁心 / $^{\circ}\text{C}$	转子铁心 / $^{\circ}\text{C}$
0.08	203.3	140.9	135.6
0.1	191.1	141	135.7
0.12	182.8	141	135.8
0.16	172.3	140.8	136
0.18	168.7	140.7	136
0.2	165.8	140.6	136.1
0.25	160.5	140.4	136.2
0.3	156.9	140.1	136.2
0.4	152.3	139.7	136.4

根据表 1~表 4，绘制电机定子绕组、定子铁心和转子铁心温度值与绝缘系统综合导热系数值的关系曲线（图 4）。可以更明确地看出，定子绝缘系统的综合导

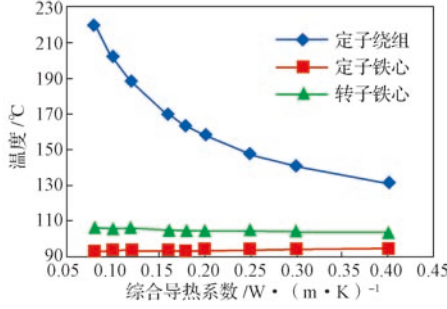
热性能对电机绕组温度值的影响最大。



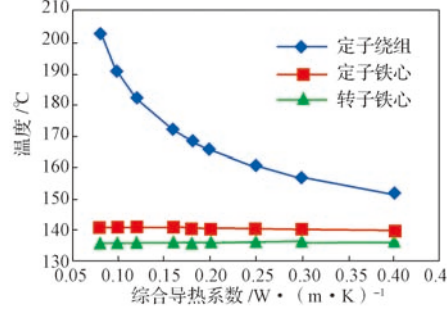
(a) 自扇风冷电机



(b) 强迫风冷电机



(c) 水冷永磁电机



(d) 风冷异步电机

图 4 电机温升与绝缘系统综合导热系数关系曲线
Fig. 4 Variation curves of temperature rise of the motor with thermal conductivity of its insulation system

由图 4 可知，随着定子绝缘系统综合导热系数值的增加，定子绕组的温度逐渐下降，但趋势逐渐变缓；定子绝缘系统综合导热性能对定子铁心和转子铁心的温度影响较小。随着绝缘系统导热性能的提高，对永磁电机而言，无论哪种冷却方式，当采用全封闭结构时，定子铁心温度略有提高，转子铁心温度略有下降；对全开启的异步电机而言，定子铁心的温度略有降低，转子铁心

的温度略微上升。从工程角度来看,定子铁心与转子铁心的温度变化几乎可以忽略不计,因此,我们日常所说的电机温升,一般是指电机绕组温升。由此可见,提升电机绝缘系统的导热性能,对于改善电机温升有较为明显的作用。

由本文所选4款电机的计算数据来看,当导热系数由 $0.1\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 提高至 $0.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,定子绕组温度可以降低约 $20\text{ K}\sim 25\text{ K}$,最高可以降低约 44 K ,这对于定子绕组温升来说是非常可观的。当导热系数由 $0.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 提高至 $0.3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,定子绕组温度降低约 $6\text{ K}\sim 9\text{ K}$,最多降低 18 K 左右;当导热系数由 $0.3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 提高至 $0.4\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,定子绕组温度降低约 $4\text{ K}\sim 10\text{ K}$ 。若要进一步降低电机绕组温升,需要更高的绝缘综合导热系数,这势必会增加材料和工艺成本,而且以目前的工艺技术水平,电机绝缘系统综合导热系数达到 $0.3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 及以上还有一定的困难。从图4示出的电机温升与绝缘系统综合导热系数变化趋势来看,当绝缘综合导热系数超过 $0.4\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 时,绕组温度降低之势趋于缓慢。在实际应用中,我们应选择绝缘系统综合导热系数的临界值。

4 结语

本文分析了电机定子绝缘系统导热性能对电机温升的影响,其中绝缘系统导热系数对电机绕组温升的影响最大。绝缘系统导热性能合理,可以在一定程度上降低电机温升,保证电机的安全可靠运行,并符合节能环保高效的要求。

通过优选绝缘材料、改进绝缘结构和规范、采用先进的制造工艺等一系列措施,同时加强过程管控并研究合理的试验方法与验证手段,可以有效提高绝缘系统的整体导热性能。但需要注意的是,在研发设计过程中,不需要一味追求高导热系数,而应寻找绝缘系统综合导热系数的临界值,这是因为当导热系数高于临界值时,对进一步降低电机绕组温升并没有明显的效果,同时带

来较高的研发、材料和工艺成本。

参考文献:

- [1] 董卓敏.热传导理论在现代电机绝缘结构设计中的应用[J].电气制造,2009(7): 34-37.
DONG F M. Application of Thermal Conductance Theory in Modern Insulation Structure Design of Motors [J]. Electrical Manufacturing, 2009(7): 34-37.
- [2] 管兆杰,黄慧洁,康骏.国内电机绝缘材料和工艺及绝缘结构现状及分析[J].电机与控制应用,2011(4): 1-5.
GUAN Z J, HUANG H J, KANG J. Situation and Analysis of Domestic Insulation Materials, Insulation Technology and Electrical Insulation Systems [J]. Electric Machines & Control Application, 2011(4): 1-5.
- [3] HAYAKAWA N, OKUBO H. Partial Discharge Characteristics of Inverter-Fed Motor Coil Samples Under AC and Surge Voltage Conditions [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005,21(1): 5-10.
- [4] 张依强.热效应对变频牵引电机绝缘特性的影响机理研究[D].成都:西南交通大学,2013.
ZHANG Y Q. Study on the Thermal Effect on Insulation Performance of Inverter-Fed Traction Motor [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [5] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,1998:1-11, 20-61.
- [6] 魏永田,孟大伟,温嘉斌.电机内热交换[M].北京:机械工业出版社,1998: 251-356.
- [7] 李岩,闫佳宁,夏加宽.基于Fluent的异步起动永磁电机温度场分析[J].电气工程学报,2015(9): 15-21.
LI Y, YAN J N, XIA J K. Temperature Field Analysis of Line-Start Asynchronous Permanent Magnet Motor Based on Fluent [J]. Journal of Electrical Engineering, 2015(9): 15-21.
- [8] 杨金霞,元约平,王健,等.永磁同步牵引电动机温度场仿真分析[J].大功率变流技术,2012(3): 43-47.
YANG J X, YUAN Y P, WANG J, et al. Simulation analysis of temperature field of permanent magnet synchronous traction motor [J]. High Power Converter Technology, 2012(3): 43-47.
- [9] 夏正泽.异步牵引电机温度场仿真分析[D].北京:北京交通大学,2008.
XIA Z Z. Analysis of Temperature Field of Asynchronous Traction Motors[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [10] STATON D A, CAVAGNINO A. Convection heat transfer and flow calculations suitable for electric machines thermal models [J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2008,50(10): 3509-3516.

中国中车承建的云南省首个扶贫集中式光伏电站并网发电

2017年4月26日,云南省兰坪传来喜讯,由中国中车公司下属的株洲变流技术国家工程研究中心有限公司承建的10 MW集中式光伏电站成功并网发电。该光伏电站装机容量为10 MW,占地面积约410亩,年均发电量为1 273.58万kW·h,可持续20年每年提供120万元扶贫资金用于当地扶贫事业,将为当地400户无劳动能力贫困户每年增加收入3 000元。

本刊曾在2014年第3期对中车光伏发电技术进行集中报道,欢迎感兴趣的专家和读者登录本刊网站(<http://ctet.crcrcic.cc>)或进入我们的微信平台(公众号为“大功率变流技术”或“dglbljs”)查阅。