

海岛多能源微网故障免疫及谐波滤除的 隔离变压器方案

黄俊翰¹, 尹建华², 马立红³, 赵进全¹, 和少寅¹, 陈鹏宇¹, 刘峰华¹, 施金志¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 718000, 西安; 2. 南方电网科学研究院, 510080, 广州;

3. 南方电网海南电网有限责任公司, 570203, 海口)

摘要: 为解决某海岛微网系统面临的多能源发电单元易受外部故障解列及3倍次谐波自由传递导致系统电能质量低下等问题,提出一种综合电站出口增设隔离变压器的一次系统改进方案。基于该海岛微网的多能源结构、海岛环境、高可靠性要求等特殊应用场景,阐述隔离变压器方案,验证同步机组励磁系统缺陷及新能源发电单元导致的谐波来源;配合应用虚拟同步发电机的光伏蓄电池支路,通过系统故障电压支撑能力、三相/零序不平衡度及谐波畸变率量化隔离变压器方案,对发电单元隔离保护及系统电能质量的提升效果有促进作用。经电磁暂态平台PSCAD验证,新方案使发电单元免疫外部故障零序冲击,综合电站出口处电压支撑能力提高了52.44%,畸变度降低了78.04%,基本完全滤除占比14.33%的励磁缺陷谐波电流,具备传统滤波器方案不具备的故障免疫及谐振过电压抑制作用,为海岛多能互补电网工程建设提供参考性方案。

关键词: 隔离变压器;海岛多能源微网;虚拟同步发电机;故障解列;励磁模型

中图分类号: TM72 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202403020 **文章编号:** 0253-987X(2024)03-0212-11

Research on an Isolation Transformer Solution for Fault Immunity and Harmonic Filtering in an Island Multi-Energy Microgrid

HUANG Junhan¹, YIN Jianhua², MA Lihong³, ZHAO Jinquan¹, HE Shaoyin¹,

CHEN Pengyu¹, LIU Fenghua¹, SHI Jinzhi¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 718000, China;

2. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China;

3. Hainan Power Grid Co., Ltd., China Southern Power Grid, Haikou 570203, China)

Abstract: To address the challenges faced by island microgrid system, such as the vulnerability of multi-source power generation units to external faults and the free transmission of triplen harmonics leading to poor power quality, this paper proposes a primary system improvement solution involving the installation of an isolation transformer at the power station's point of common coupling (PCC). This paper elaborates on the new isolation transformer solution based on the island microgrid's unique characteristics, including its multi-energy structure, island environment, and high reliability requirements. It also verifies the sources of harmonics resulting from defects in the excitation system of synchronous generators and the new energy generation units. Furthermore,

in conjunction with the application of virtual synchronous generator (VSG) technology in a photovoltaic battery branch, this study quantifies the effects of the isolation transformer solution on the isolation protection of generation units and the enhancement of system power quality, with the system's fault voltage support capability, three-phase/zero-sequence imbalance, and harmonic distortion rate. Lastly, the new solution is validated using the electromagnetic transient platform PSCAD. The results show that the solution provides immunity for generation units against external fault zero-sequence impacts. It also enhances the voltage support capability at the power station's PCC by 52.44%, reduces distortion by 78.04%, and effectively eliminates 14.33% of harmonic currents associated with defects in the excitation system. This solution offers fault immunity and suppresses resonance-induced overvoltage, which cannot be achieved using conventional filter solutions. It provides valuable insights for the construction of island-based multi-energy complementary grids.

Keywords: isolation transformer; island multi-energy micro-grid; virtual synchronous generator; fault disaggregation; excitation model

海岛上的电源-储能-负荷设备天然组成一个孤立的微网系统,相对大陆的高压大电网而言,海岛微网受到自然条件、投资、工程等方面更多的限制,并存在电能来源复杂、稳定性差、电能质量差、负荷波动大等问题。与此同时,国家发改委于 2022 年 6 月印发的《“十四五”可再生能源发展规划》中,特别提到对于有电力需求、可再生能源资源丰富的相关海岛,推进多能互补电力系统示范工程。

本文针对某海岛微网现存问题开展研究,具体内容如下。

(1)系统应对故障能力低下,表现在外部故障极易侵入发电单元组导致其解裂甚至损坏,以致海岛微网系统全黑。据统计,近 3 年出现影响机组运行的故障、缺陷共 39 台次,包括电球、冷却系统、轴承箱、蓄电池、励磁系统、进排气、并机柜等设备或部件问题,其中电球绝缘降低等受三强、三高恶劣环境影响导致的故障、缺陷共 18 台次,占比最高(46%),平均每年修理费用高达 446 万元。

(2)电能质量低下,达 20% 的谐波含量在系统中自由传递,表现在柴油发电机绕组热效应加剧、电缆线路传输损耗加剧及分布式发电单元出力加剧。经现场录波分析,光伏等分布式发电单元及负荷端非线性不平衡负荷是固有谐波来源^[1-2];3k 次谐波占总谐波比例较高,如图 1 所示,柴油发电机组励磁系统缺陷是其主要来源。励磁磁通曲线中可分解出基波与谐波分量,基于气隙结构采用冻结磁导率法研究励磁绕组中电流对磁场分布的影响。进一步计算励磁系统与三次谐波绕组电压的关系,利用傅里叶级数的形式,分析了感应线圈中电流的谐波含量^[3-4]。

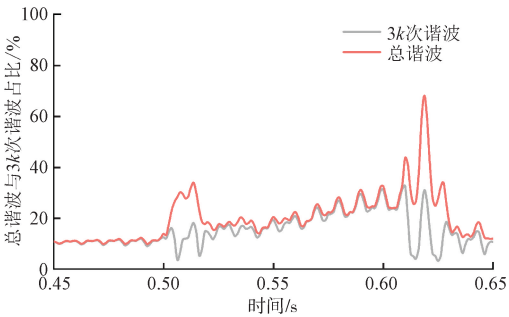


图 1 现场录波快速傅里叶分析

Fig. 1 FFT analysis of field-recorded waveform

针对上述问题,提出基于隔离变压器(IT)的海岛微网综合优化方案,其具备传统滤波器方案不具备的隔离故障冲击与耗散谐波作用。隔离变压器是应用于数据中心、雷达站等孤立电网关键设备的防雷措施^[5-7],少见其应用于海岛多能源微网。

首先,三相四线制隔离变压器改变线路拓扑结构,依靠磁路隔离外部故障导致的过电压,并将过电流经隔离变压器中性点泄放^[7]。其中系统拓扑改变可能导致的电源端故障测控装置因零序电压被隔离而无法准确识别的问题,可采用隔离变压器出线侧安装电压互感器加以改进^[8-9]。隔离变压器中性点接地方式实验参考某 10 kV 配电系统变压器的接地故障起火案例^[10],即解决新增隔离变压器中性点保护整定值与配网线路继保时延配合难的问题,使隔离变压器保护和线路继保正确配合。

其次,关于隔离变压器方案新能源支路电流不平衡问题,于虚拟同步发电机(VSG)控制中引入频

率和相角检测广义积分器锁相环(DSOGI-PLL)技术^[11]。文献[12-13]忽略隔离变压器具备的消耗谐波,减小了畸变,改善了电能质量。近年最新研究开始探讨在分布式新能源发电微网中增设隔离变压器的作用,探讨多种新能源配网系统交流母线隔离变压器对系统故障暂态量、并离网暂态量、谐波量的作用^[14-17]。

励磁缺陷分析参考三峡发电机励磁系统实例中的谐波及其变压器损耗,分析非对称条件下励磁系统电流与绕组涡流损耗,阐述包含励磁绕组控制信号的励磁系统建模^[18]。分析励磁电流基谐波对发电机变压器励磁功率关系、原副边绕组谐波畸变率等参数^[19-23]。最终通过与传统滤波器方案对比,得到隔离变压器方案在电压支撑、谐波滤除及降低不平衡度等方面的效果^[24-27]。

本文海岛微网基本参数和计算方法由南方电网科学研究院与海南能源院提供,所提出的隔离变压器方案可解决多能源海岛微网稳定性和电能质量两方面问题。经电磁暂态平台PSCAD验证,新方案使发电单元免疫外部故障零序冲击,综合电站出口处电压支撑能力提高了52.44%,畸变度降低了78.04%,基本完全滤除占比14.33%的励磁缺陷谐波电流,为海岛电网工程建设提供了一种参考性方案。

1 系统分析

1.1 海岛微网结构及特殊性分析

该海岛微网主要组成部分包括柴油发电机组、电缆输电线路、光伏蓄电池储能系统、台区变压器、负荷等,如图2所示。

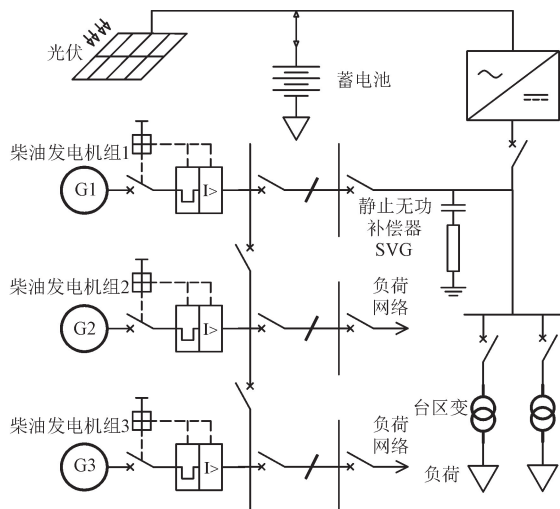


图2 多能源海岛微电网结构

Fig. 2 Multi-energy island microgrid structure

海岛综合电站一次接线系统为10 kV单母线三分段,并联机组直接经由发电厂母线上网,发电单元本体高次谐波未经抑制便往配电网输送,其配电线路均为电缆线路。高次谐波在分布电容作用下产生较高损耗,导致机组出力增大及热效应加剧,现有的应对方法为多机间歇性运行。

为设计针对故障应对及谐波抑制的新方案,需考虑该海岛微网应用场景的特殊性。

(1)结构特殊性。海岛电站电气一次部分接线型式导致馈网母线无中性点接口,未安装也无法安装小电流选线装置,故线路开关无法准确隔离线路单相接地故障,外部故障冲击极易导致发电单元保护动作,严重则导致机组解列。因此,有必要研究是否可通过新方案完善系统一次接线,设置中性点实现故障选线和精确隔离。

(2)孤岛特殊性。大陆电网发电机出口自带三角形/星形(D/Y)升压变,本身具备隔离作用,然而海岛电网中,为方便孤岛系统故障重启,往往采用发电机直接带载。海岛孤岛微网解决故障解列和电能质量问题的传统方案是滤波器并配合改进接地继保算法,很少考虑到增设隔离变压器方案,新旧方案缺少对比研究,缺少效果量化和优缺点分析。

(3)需求特殊性。民用10 kV配网系统考虑到经济成本及足够完善的继保系统,很少额外应用隔离变压器,而海岛军民两用系统关键负荷对不间断可靠运行提出更高要求,凸显隔离变压器方案必要性。

1.2 隔离变压器方案适用性分析

基于上述特殊性,提出增设隔离变压器方案以取代传统滤波器方案,理由如下。

(1)增设D/Y隔离变压器满足馈电母线增设中性点的要求,达到故障选线及精确隔离目的;(2)隔离变压器实现发电单元与外部系统的电气隔离,阻止外部故障冲击侵入发电单元,滤波器方案不具备该作用;(3)隔离变压器三角形绕组可代替滤波回路实现 $3k$ 次谐波滤除作用;(4)隔离变压器方案不存在滤波器方案因海岛外部系统扩建电容参数动态变化导致的谐振过电压问题;(5)军民两用系统对工程造价相对不敏感。

1.3 故障应对能力分析

现有系统基本不具备故障电压支撑能力,电压总畸变程度 H_{total} 达11.75%,且 $3k$ 次谐波畸变度达10.83%。隔离变压器方案及传统方案的故障应对能力通过故障下电压支撑能力、零序/三相不平衡

度、总谐波畸变率等参数衡量。

(1)电压支撑能力

ε_s = $\frac{U_{\text{Drop}}}{U} \times 100\%$ (1)

式中:U_{Drop}为故障电压跌落值;U为电压有效值。

(2)零序/三相不平衡度

ε_{ub} = $\frac{U_0^2 + U_-^2}{U_0^2 + U_+^2 + U_-^2} \times 100\%$ (2)

式中:U₀、U₊、U₋分别为零序、正序、负序电压有效值。计算零序不平衡度,即令U₋ = 0。

(3)总谐波畸变率

H_{total} = $\sqrt{\sum_{i=2}^N \left(\frac{H_i}{H_1}\right)^2} \times 100\%$ (3)

式中:H_i为i次谐波畸变值。

1.4 谐波来源分析

海岛微网电能质量问题表现在谐波含量过大,3k次谐波占比可达10%~20%,同幅值谐波对绕组的热效应达3k倍,且高频谐波易消散于电缆线路对地分布电容,造成机组出力加剧。

针对岛上现安装的卡特公司某型号凸极同步电机,其励磁磁势空间分布呈矩形,气隙磁密B_δ为

B_δ = $\frac{\Phi}{\alpha'_p \tau l_{ef}}$ (4)

式中:Φ为每极磁通,根据给定的绕组感应电动势确定;τ为极距;α'_p为极弧系数;l_{ef}为电枢计算长度。因此,气隙磁压降定量分析在于计算极弧系数α'_p、电枢计算长度l_{ef}和气隙系数K_δ。

为减小励磁产生的高次谐波分量,一般通过改变电机极距使气隙磁密尽可能接近正弦分布

B(x) = B_δcos($\frac{\pi}{\tau}x$) = $\frac{\mu_0 F_\delta}{\delta} \cos(\frac{\pi}{\tau}x)$ (5)

即

δ(x)_{max} = δ($\frac{\hat{b}_p}{2}$) = δ / ($\cos \frac{\pi}{\tau} \frac{\hat{b}_p}{2}$) (6)

式中:δ_p为极弧长度,取(0.55~0.75)τ。凸极机气隙磁场波形曲线α'_p = f(δ_p/τ)通过现场录波确定。

另一谐波来源是光伏蓄电池系统,采用VSG控制,整体外特性与同步电机类似,但其等效主电路和励磁电路传递特性由控制参数确定。

行业与国家标准中并没有明确凸极机系统谐波标准,仅有同步电机或隐极机相关标准。本文参考微电网电能质量和气隙磁路更良好的隐极机标准,即规定微网公共耦合点在发电机空载电压和额定转速下,电压波形全畸变小于5%。然而,实际情况更加恶劣:①凸极机气隙情况差于隐极机,制造工艺引

入3k次谐波;②电机带载运行(非线性不平衡负载)导致极化磁场增大,电枢反应增强,加剧了漏磁、磁饱和、磁场畸变等效应;③海岛电缆线路分布电容谐波耗散效应,导致综合电站出口谐波含量高于公共耦合点。以上因素支撑现场0.2%谐波缺陷观测结果。

2 隔离变压器方案

2.1 故障免疫及谐波滤除方案

海岛10kV多能源多机组微网,于综合电站出口处(电缆线路前端之前)设置隔离变压器,改造方案如图3所示。隔离变压器方案效果如下。

(1)综合电站与外部系统形成有效电气隔离,形成厂站发电侧系统(并机母线)及外部馈电配电网系统(馈电母线)。依靠磁路充分隔断来自外部系统非对称故障对综合电站中性点的故障冲击,零序电流改从隔离变压器中性点泄放。

(2)综合电站出口处隔离变压器三角形绕组,将发电侧系统3k次谐波电流以涡流形式损耗在隔离变压器中,并隔断外部不平衡负荷及电力电子设备固有谐波侵入综合电站。

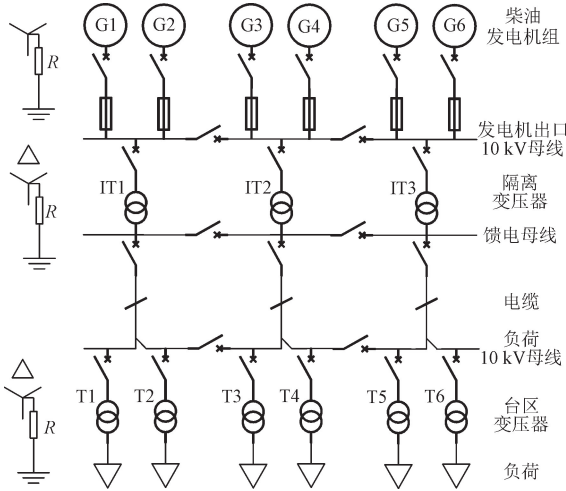


图3 海岛微电网隔离变压器方案改进一次接线图

Fig. 3 Improved primary wiring diagram of isolation variable scheme for island microgrid

2.2 新能源支路接口隔离变压器方案

新能源支路采用与隔离变压器配合的虚拟同步发电机技术,如图4所示。海岛分布式光伏蓄电池发电单元及后续风能、潮汐能等分布式系统是当下海岛多能源工程主要发展方向,其中含大量电力电子器件,比机械机组有更复杂的谐波成分、更小的惯性和阻尼系数,因此引入VSG以增加海岛微网整体稳定

性。VSG 控制最大优势是使光伏蓄电池支路外特性等效为同步发电机,虚拟同步并网电机参数方程为

$$\frac{P_m - P_e}{\omega} = J \frac{d\omega}{dt} + D(\omega - \omega_0) \quad (7)$$

$$k_q(Q_0 - Q_m) + E_0 = E \quad (8)$$

$$P_e = v_d i_d + v_q i_q \quad (9)$$

式中: P_m 为机械功率; P_e 为电磁功率; ω 为电角频率; ω_0 为额定电角频率; J 为转动惯量; D 为阻尼系数; Q_m 为实际无功功率; Q_0 为额定无功功率; E 为实际输出电压; E_0 为额定输出电压; k_q 为无功下垂比例系数; v_d 、 v_q 分别为功率采样点电压的 dq 轴分量; i_d 、 i_q 分别为功率采样点电流的 dq 轴分量。

积分电角度 θ 用于锁相环和坐标变换,变换公式如下

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (10)$$

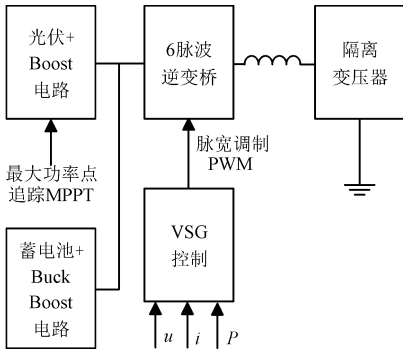


图 4 新能源支路配合隔离变压器

Fig. 4 New energy branch circuit matching isolation transformer

基于综合电站输出母线参数采样,实现新能源发电单元与柴油发电机组的同步互补运行。令 δ 为 dq 坐标轴下虚拟同步发电机机端电压与公共耦合点电压的电角度差值,经过电阻 R 、电抗 X 的线路传递至综合电站出口母线,输出电磁功率 P_e 为

$$P_e = \frac{E}{R^2 + X^2} (XV \sin\delta + RE - RV \cos\delta) \quad (11)$$

可得新能源虚拟同步 dq 坐标系下的传递框图如图 5 所示,其中直轴交轴参考电压方程

$$v_{d,ref} = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)(i_{d,ref} - i_d) - \omega L i_q + v_d$$

$$v_{q,ref} = -\left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)(i_{q,ref} - i_q) - \omega L i_d + v_q$$

$$(12)$$

式中: k_p 、 k_i 分别为比例系数、积分系数; $i_{d,ref}$ 、 $i_{q,ref}$ 分别为功率采样点电压的 dq 轴分量参考值; L 为逆变器出口滤波器电感。

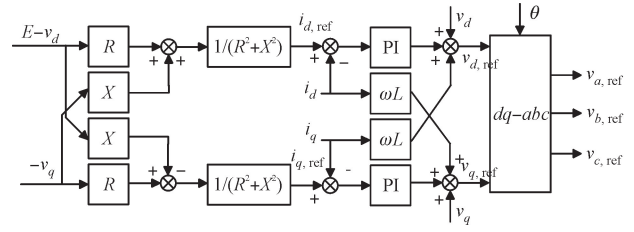


图 5 新能源支路隔离变压器方案传递框图

Fig. 5 New energy branch circuit isolation transformer program transfer block diagram

3 海岛微网综合改造

3.1 模型建立与谐波来源验证

基于 1.1 节中海岛微网结构建立电磁暂态仿真模型如图 6 所示,包含同步发电机、隔离变压器、光伏蓄电池系统、电缆线路、台区变压器、故障逻辑及三相负荷等。由表 1 可以看出:参数设置包括凸极转子定子设置和励磁系统设置、电缆参数、非线性运行的负荷模拟参数。参数参考该岛多机组间歇性运行情况和 2022 年最大民用负荷值。

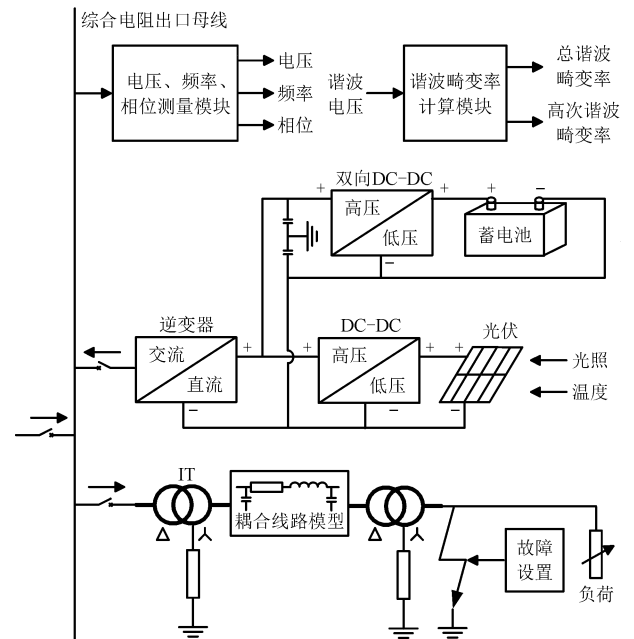


图 6 海岛微电网系统电磁暂态模型

Fig. 6 Electromagnetic transient modeling of island microgrid system

表 1 海岛微电网模型参数

Table 1 Parameters of the island microgrid model

参数	数值
隔离变压器原副边变比	10:10.2
隔离变压器容量/(MV·A)	5
隔离变压器正序漏抗	0.1
原副边磁化电流	0.01
电缆长度/km	6
波阻抗/(Ω·km ⁻¹)	0.046
分布电容/(μF·km ⁻¹)	0.3
铜损铁损	0.01

同步电机模型见图 7,由等效 12 缸、二冲程或四冲程内燃机原动机,由励磁系统、电力系统稳定器、转轴转矩模块、内燃机模块等部件组成。内燃机原动机设置轴燃料系数 F_L ,通过转速 ω 反馈控制输出机械轴转矩,发电机转轴转矩模块通过电磁转矩 T_e 和机械转矩 T_m 控制转速 ω 。

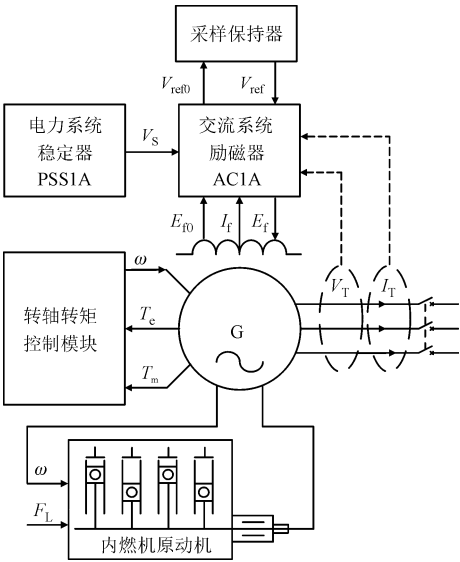


图 7 完善励磁系统的同步电机模型

Fig. 7 Refinement of synchronous motor model for excitation system

基于电磁暂态仿真平台 PSCAD 验证励磁系统缺陷。设置动态传递函数模拟的交流励磁系统整流励磁器 AC1A 包含输入输出量。

输入量:输出励磁电压初始值 E_{f0} ;同步机终端三相电压 V_T 、终端电流 I_T 皆为基于采样的复数量,实部同相,虚部正交;基于电力系统稳定器 PSS1A 的励磁机电压稳定信号 V_S ;同步发电机参考电压 V_{ref} 。输出量:励磁系统计算得到的同步发电机励磁

电压 E_f 及同步发电机参考电压初始值 V_{ref0} 。

励磁系统电压信号(电机输出电压参考值 V_{ref} 、电力系统稳定器调节量 V_S 、终端电压传感器及负载补偿元件调节量 V_C 和励磁系统稳定器输出电压 V_F 等)通过比例微分、惯性、限幅、防止过励磁或欠励磁等环节,输出电压调节器输出信号 V_R ,如图 8 所示。在排除励磁机磁场电流感应信号 V_{FE} 干扰后积分得到励磁器电压信号 V_E ,结合励磁器负载程度,最终输出励磁电压 E_f , V_E 、 E_f 公式如下

$$V_E = \int V_R - V_{FE} \quad (13)$$

$$E_f = F_E V_E = f(I_N) V_E = f\left(\frac{X_f I_f}{V_E}\right) V_E \quad (14)$$

式中: F_E 为整流器负载系数; I_N 为归一化的励磁电流; X_f 为同步电机励磁整流电抗; I_f 为励磁电流; 该式表明励磁电压与负载情况有关。

此外,同步电机的谐波量与励磁的饱和度密切相关,由饱和度函数 $S_E(V_E)$ 量化,以此计算励磁系统反馈量 V_{FE} ,励磁机磁场电流成正比的信号为

$$V_{FE} = I_f K_I + V_E K_E + V_E S_E(V_E) \quad (15)$$

式中: K_I 为励磁电流系数; K_E 为励磁器磁场常数。式(15)表明励磁系统反馈量 V_{FE} 与励磁电流、电压及其饱和度有关。

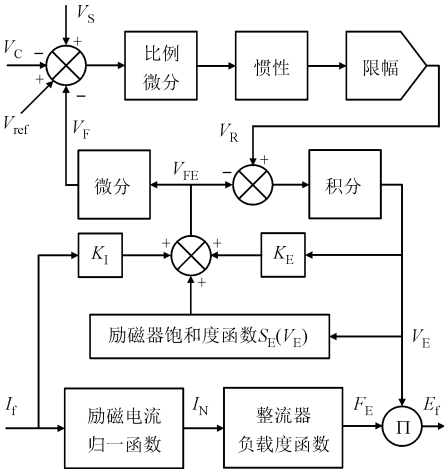


图 8 励磁系统信号传递框图

Fig. 8 Block diagram of excitation system signals

如图 9 所示,基于上述励磁缺陷复现综合电站出口处三次谐波电流与基波电流有效值分别达 24.06 A 和 167.90 A,比值达 14.33%。表明凸极同步电机高负载运行与励磁器高饱和程度加剧励磁缺陷,导致综合电站出口处谐波含量过高,印证谐波含量达 20% 的现象,符合现场故障录波结果。

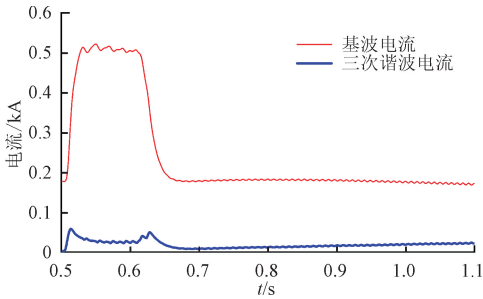


图 9 励磁缺陷导致的谐波电流

Fig. 9 Harmonic currents due to excitation defect

3.2 隔离变压器故障免疫效果

隔离变压器方案改变系统拓扑,外部故障零序分量流经隔离变压器中性点,从而隔离发电单元中性点,阻止其电位偏移,基本隔绝对地电流。通过新旧方案对比实验,重点观测电站出口处电压波动、零序分量隔离效果及零序电流在各种接地方式下的效果。

(1)电压支撑能力。观测不同方案下电站出口电压支撑能力,量化值如表 2 所示,基波、谐波波形如图 10 所示。

表 2 电站出口电压支撑能力量化参数

Table 2 Quantitative parameters of the exit voltage support capacity of the power station

参数	数值		
	隔离变压器方案	滤波器方案	原有方案
电压基波幅值/kV	6.14	6.09	6.05
电压跌落值/kV	3.22	0.20	0
电压峰值/kV	6.20	7.78	6.15
电压支撑能力/%	52.44	3.28	0

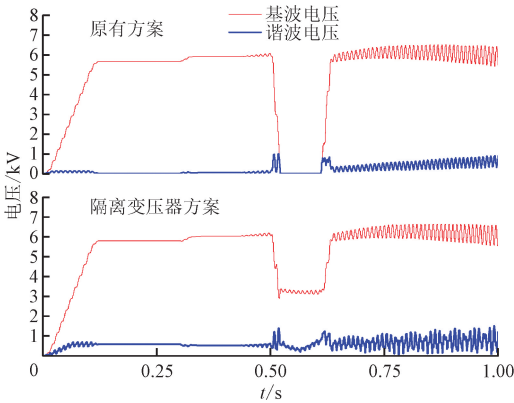


图 10 隔离变压器方案对基波与谐波电压的影响

Fig. 10 Effect of isolation transformer scheme on fundamental and harmonic voltages

由表 2 可以看出:与原有方案对比,隔离变压器

方案不影响电压基波幅值;隔离变压器方案使故障时间段的电压跌落值从 0 提高到 3.22 kV,电压支撑能力从 0 提高至 52.44%,可见故障对发电单元冲击明显降低。

隔离变压器方案与滤波器方案电压支撑波形如图 11 所示。由图 11 可见,滤波器方案在故障条件下的电压支撑能力基本为 0,甚至在故障切除电压回升过程中出现 7.78 kV 过电压峰值,隔离变压器方案电压支撑能力优于传统滤波器方案。

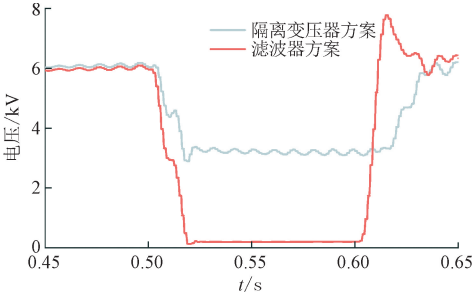


图 11 隔离变压器与滤波器方案电压支撑能力对比

Fig. 11 Comparison of voltage support capability of isolation transformer scheme and filter scheme

(2)故障零序分量隔离。新旧方案下,电站出口电压各相序分量波形如图 12 所示,不平衡度量化值如表 3 所示。

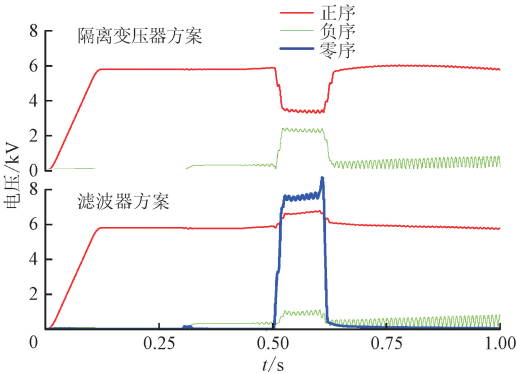


图 12 隔离变压器与滤波器方案电站出口电压各序分量

Fig. 12 Sequence components of plant exit voltage for isolation transformer and filter scheme

表 3 电机出口处不平衡度量化值

Table 3 Quantitative value of unbalance at the motor outlet

参数	状态	数值	
		隔离变压器方案	滤波器方案
零序不平衡度/%	故障	0	55.78
	非故障	0	0
三相不平衡度/%	故障	30.96	56.47
	非故障	1.82	2.04

由表 3 可以看出:①非故障条件下,两种方案零序和三相不平衡度均在合理范围内;②故障条件下,隔离变压器可以完全隔离非对称故障导致的零序分量,阻止零序保护跳闸;③滤波器方案对故障零序分量没有隔离作用。

两种方案零序/三相不平衡度如图 13 所示。该波形将表 3 不平衡度量化值扩展到该时间段的变化,表明隔离变压器方案比滤波器方案有更优的零序分量隔离效果,零序不平衡度基本降至 0,三相不平衡度降低 45%。

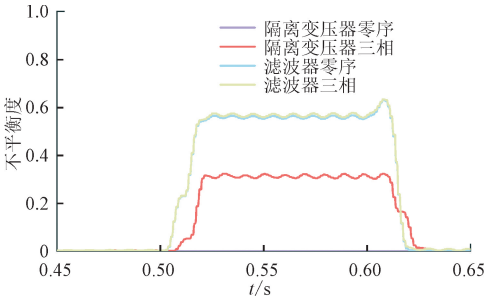


图 13 两种方案零序/三相不平衡度对比
Fig. 13 Zero-sequence/three-phase unbalance for isolation transformer and filter scheme

(3)中性点接地方式影响。设置隔离变压器中性点不同接地方式,观测其对地电流波形如图 14 所示,幅值如表 4 所示。

表 4 不同接地方式下的中性点电流幅值
Table 4 Neutral current amplitude for different earthing methods

接地方式	电流峰值/kA
大阻抗接地	0.02
4.0 Ω 接地	0.87
2.0 Ω 接地	1.09
0.5 Ω 接地	1.29
直接接地	1.42

由表 4 可以看出:接地电阻与隔离变压器中性点对地电流的大小呈负相关,该岛实际采用 4.0 Ω 接地方式,此时电流峰值达 0.87 kA,需要进行线路继保整定配合;大阻抗接地会导致泄放电流过小,隔离变压器中性点与绕组之间的绝缘压力变大。

3.3 隔离变压器谐波滤除效果

(1)电压畸变程度。隔离变压器方案及对比方案的三相电压波形如图 15 所示,隔离变压器方案($H_{\text{total}}=2.58\%$)与滤波器方案($H_{\text{total}}=2.24\%$)均能极大改善原系统电压畸变程度($H_{\text{total}}=11.75\%$),新

方案降低畸变比例效果(78.04%)不逊色于传统方案的效果(80.94%)。

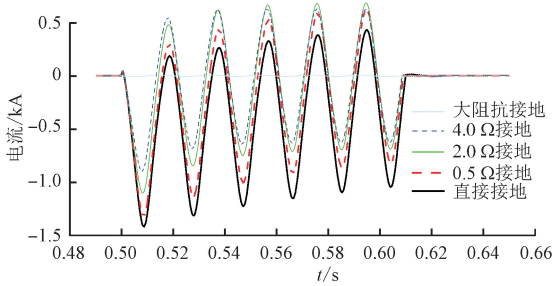


图 14 不同接地方式的隔离变压器中性点对地电流
Fig. 14 Neutral-to-earth currents of isolated voltage transformers with different grounding methods

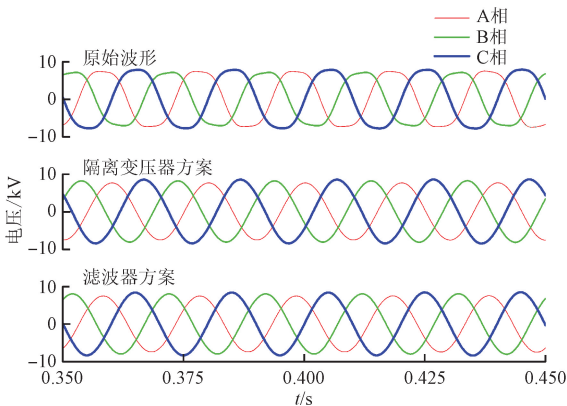


图 15 隔离变压器、滤波器及原方案三相电压波形
Fig. 15 Three-phase voltage waveforms of isolation transformer, filter and original scheme

(2)故障谐波。上述提到系统谐波是同步机励磁、电力电子非线性元件和不平衡负荷综合作用,观测隔离变压器首末端总谐波含量如图 16 所示,特别是发生外部故障继保动作时,外部系统向机组传递谐波出现两个明显峰值为 0.52 s($H_{\text{total}}=33.22\%$)、

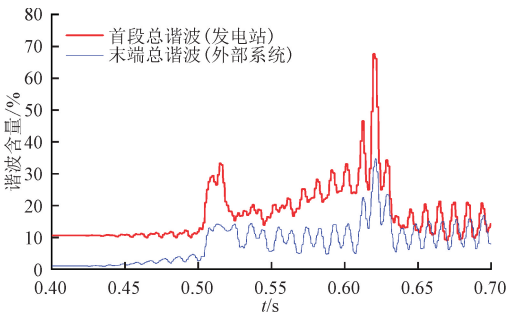


图 16 隔离变压器首末端谐波含量
Fig. 16 Harmonic content at primary and secondary ends of the isolation transformer

0.62 s ($H_{\text{total}}=67.56\%$), 经隔离变压器后总谐波畸变率分别降低至 13.79%、34.66%, 谐波峰值降低比例达 58.49%、48.70%。

两种方案单相故障下三相电压波形如图 17 所示。滤波器方案往往针对特定频率谐波, 在系统发生故障或负载谐波频谱变化较大时效果不佳, 并可能引发谐振过电压, 其可靠性低于隔离变压器方案。

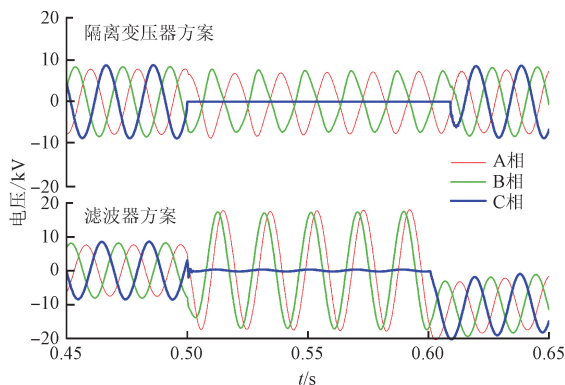


图 17 隔离变压器与滤波器方案单相故障下三相电压波形

Fig. 17 Three-phase voltage waveforms under single-phase fault with isolation transformer and filter scheme

4 结 论

本文基于海岛多能源微网系统中面临的故障解列及谐波含量过高问题, 提出基于隔离变压器的综合应对方案, 通过电磁暂态平台 PSCAD 量化效果。新旧方案的对比实验验证表明, 隔离变压器方案使发电单元免疫外部故障零序冲击, 综合电站出口处电压支撑能力提高 52.44%, 畸变度降低 78.04%, 基本完全滤除占比 14.33% 的励磁缺陷谐波电流, 得出隔离变压器方案的主要优势如下。

(1) 为发电单元提供良好的电气隔离, 阻隔外部系统非对称故障零序电流侵入发电单元中性点, 杜绝外部系统故障导致发电单元越级跳闸以及因中性点电压严重偏移引起发电端设备绝缘损坏。

(2) 滤除励磁缺陷和故障引发的高次谐波, 抑制高次谐波在系统中的自由传递, 降低发电机绕组温升及减少损耗, 改善电压畸变度与不平衡度。

(3) 在馈电母线侧增设有效中性点接地点, 满足小电组接地保护及故障选线装置安装条件, 实现精确隔离目的。

(4) 与滤波器方案相比, 隔离变压器方案杜绝了因 SVG、电缆馈线、滤波器等外部容性设备参数动态变化与电机绕组形成串联谐振引发的过电压问题。

(5) 有利于系统稳定运行、维护、扩展以及解决其他系统性问题, 如缓解海岛夜间轻负荷或容性负荷导致发电支路进相运行易失稳问题。

同时, 海岛电网工程建设需要全方面考虑投资、地理、工程等实际因素限制, 增设隔离变压器方案的不足如下。

(1) 隔离变压器本身作为电力设备, 需要维护保养, 防止新增设备和系统拓扑改变给海岛微网增加新的严重问题。

(2) 由于故障电流由隔离变压器星型中性点泄放, 需要结合实地情况完善考虑接地方式。

(3) 需要安装新设备、增加投入, 提高工程造价, 增加占地面积。

综合上述优缺点, 针对该海岛多能源微网实例, 相对传统滤波器方案, 隔离变压器方案最大优势即最大创新点在于, 完全隔绝外部故障零序分量对多能源发电单元的冲击, 以及从励磁缺陷根源解决微网谐波自由传递问题, 该案例对推进同类海岛的多能互补工程具有参考意义。

参考文献:

- [1] 赵伟, 李雄, 乔仁飞, 等. 基于混合储能的孤岛微网 VSG 控制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 33-40.
- ZHAO Wei, LI Xiong, QIAO Renfei, et al. VSG control strategy of an isolated microgrid based on hybrid energy storage [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 33-40.
- [2] HAMZEH M, EMAMIAN S, KARIMI H, et al. Robust control of an islanded microgrid under unbalanced and nonlinear load conditions [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(2): 512-520.
- [3] ZHU Shushu, HU Yaohua, LI Jian, et al. Magnetic field analysis and operating characteristics of a brushless electrical excitation synchronous generator with DC excitation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(8): 1-7.
- [4] XIA Yonghong, HUANG Shaogang, GUI Aigang, et al. Analysis of the no-load harmonic electromagnetic field of synchronous generator using tooth flux method [C]//2008 International Conference on Electrical Machines and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 118-121.
- [5] 夏亮, 杨江平, 邓斌, 等. 雷达站电源综合防雷系统研究与设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47

- (16): 143-150.
- XIA Liang, YANG Jiangping, DENG Bin, et al. Study and design of comprehensive lightning protection system for power supply of radar station [J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47 (16): 143-150.
- [6] 龙桂才, 倾鹏程, 杜宇飞, 等. 隔离变压器在雷达应急发电机中的防雷应用 [J]. *气象研究与应用*, 2018, 39(1): 115-117.
- LONG Guicai, QING Pengcheng, DU Yufei, et al. The application of the isolation transformer in radar emergency generator [J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2018, 39(1): 115-117.
- [7] 高美金, 狄谦, 王婷婷, 等. 用于移动变电站的三相隔离变压器的降阶模型研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(1): 32-41.
- GAO Meijin, DI Qian, WANG Tingting, et al. Research on reduced order model of three-phase isolated transformer used in a mobile substation [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(1): 32-41.
- [8] 张宇. 隔离变压器对 10 kV 线路单相接地故障检测的影响分析及处理 [J]. *内蒙古电力技术*, 2021, 39(6): 78-81.
- ZHANG Yu. Influence analysis of isolation transformer on single-phase grounding fault detection function of 10 kV line and its treatment [J]. *Inner Mongolia Electric Power*, 2021, 39(6): 78-81.
- [9] NAZIR M, BURKES K, ENSLIN J H. Transformation of conventional transformers for enhanced DC mitigation in AC power networks with advanced grid support [J]. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 2023, 3: 100101.
- [10] 俞斌, 胡卓然, 李黎, 等. 10 kV 大容量配电变压器差动保护配置应用研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(22): 98-104.
- YU Bin, HU Zhuoran, LI Li, et al. Differential protection configuration of a 10 kV large capacity distribution transformer [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(22): 98-104.
- [11] JIANG Hao, CAO Shuyu, SOH C B, et al. Unbalanced load modeling and control in microgrid with isolation transformer [C]//2021 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 129-135.
- [12] 彭钰, 魏巍. 浅谈隔离变压器的使用 [J]. *有色冶金节能*, 2021, 37(3): 70-74.
- PENG Yu, WEI Wei. Analysis of the use of isolation transformer [J]. *Energy Saving of Nonferrous Metallurgy*, 2021, 37(3): 70-74.
- [13] 严威. 隔离变压器在孤岛电站中的应用研究 [J]. *电力勘测设计*, 2021(6): 68-71.
- YAN Wei. Research on application of isolation transformer in the islanding power station [J]. *Electric Power Survey & Design*, 2021(6): 68-71.
- [14] BUI D M, CHEN Shilin, LIEN K Y, et al. Investigation on transient behaviours of a uni-grounded low-voltage AC microgrid and evaluation on its available fault protection methods: review and proposals [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 75: 1417-1452.
- [15] 曹雷, 张建成. 光伏并网系统隔离变压器联接方式的应用研究 [J]. *电网与清洁能源*, 2012, 28(7): 84-88.
- CAO Lei, ZHANG Jiancheng. Research on the isolation transformer connection mode in the grid connected photovoltaic system [J]. *Power System and Clean Energy*, 2012, 28(7): 84-88.
- [16] CASSOLA F, BURLANDO M. Wind speed and wind energy forecast through Kalman filtering of numerical weather prediction model output [J]. *Applied Energy*, 2012, 99: 154-166.
- [17] 侯宇程, 李香龙, 林志法, 等. 新型分布式新能源并网逆变器及功率脉动抑制 [J]. *电力电子技术*, 2023, 57(3): 87-90, 103.
- HOU Yucheng, LI Xianglong, LIN Zhifa, et al. A novel distributed new energy grid-connected inverter and its power pulsation suppression [J]. *Power Electronics*, 2023, 57(3): 87-90, 103.
- [18] 程冲. 多功能并网逆变器若干关键技术的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [19] HUANG Shaogang, LIU Tongjuan, YE Jianyong, et al. Harmonic analysis in excitation system of the Sanxia generator [C]//ICEMS'2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 246-249.
- [20] KUVSHINOV A A, VAKHNINA V V, CHERNENKO A N. Impact of geinduced currents on excitation mode of synchronous generator at power plant [C]//2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2022: 37-42.
- [21] NICOLAE P M, NICOLAE I D. On harmonics from a power transformer used in the excitation circuit of a power group [C]//Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power-ICHQP 2010. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1-6.
- [22] 梁浩, 谢欢, 陈瑞, 等. 发电机励磁系统 RTDS 仿真

- 建模与 AVR 入网检测分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(11): 145-150.
- LIANG Hao, XIE Huan, CHEN Rui, et al. RTDS modeling of generator excitation system and AVR device testing for power grid access [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2019, 31(11): 145-150.
- [23] 李青兰, 黄伟, 陈磊, 等. 电力系统稳定器影响频率振荡的机理及阻尼分析方法 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 67-73.
- LI Qinglan, HUANG Wei, CHEN Lei, et al. Mechanism and damping analysis method of impact of power system stabilizer on frequency oscillation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 67-73.
- [24] TIAN Ye, LUO Longfu, LI Yong, et al. A dual harmonic balanced configuration transformer with harmonic multi-port isolation: design, modeling and analysis [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 145: 108628.
- [25] ZAHERNIA A, RAHBARIMAGHAM H. Application of smart transformers in power systems including PV and storage systems under unbalanced and nonlinear load and fault condition [J]. Electric Power Systems Research, 2021, 201: 107535.
- [26] 武凤霞. 并网电池储能系统中双向变流器的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [27] 范满义, 史黎明, 殷正刚, 等. 感应电能传输系统基于阶梯波合成技术的谐波消除和脉冲密度功率调节方法 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6516-6523.
- FAN Manyi, SHI Liming, YIN Zhenggang, et al. Harmonic elimination and power regulation with pulse density modulation based on staircase waveform for multilevel inverters in inductive power transfer system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6516-6523.

(编辑 杜秀杰)