

ABSTRACT

The rapid advancement of renewable energy has profoundly transformed the energy sector over the past decade. Microgrids, which integrate renewable energy sources with localized loads, offer a sustainable solution to meet the growing global energy demand while mitigating environmental impacts. Typically positioned near distribution networks, microgrids employ power converters to operate effectively in both off-grid and grid-connected modes. Progress in technology, supportive policies, and the adoption of custom power devices have enhanced the flexibility and reliability of microgrids, significantly boosting their performance. However, the inherent unpredictability of renewable energy sources introduces challenges, such as irregular power generation and complex integration with the main utility grid. Furthermore, the increasing deployment of microgrids within the power grid brings issues such as poor power factor, stability concerns, power quality degradation, and intricate power management requirements. To overcome these challenges, it is essential to develop advanced circuit configurations and sophisticated control algorithms that ensure the efficient and stable operation of microgrids. These innovations are crucial for enabling a sustainable and resilient energy future.

This research emphasizes the development of a variable-speed, fixed-pitch wind energy generation system (WEGS) designed for efficient energy utilization. The system features two voltage source converters (VSCs) arranged in a back-to-back configuration with a shared DC link. The rotor-side converter (RSC) is responsible for maximizing wind energy extraction, while the grid-side converter (GSC) ensures smooth integration with the utility grid, managing power flow to the grid and local loads, including auxiliary services. For solar energy generation, the system can be designed to operate in either single-stage or two-stage configurations, depending on the specific application requirements. The primary objective is to achieve efficient energy

generation from both variable-speed wind turbines and solar photovoltaic arrays. Key challenges include maintaining consistent power output despite fluctuations in wind speed and solar irradiance, as well as ensuring stable and reliable grid integration.

This study explores two distinct configurations for forming a local grid. The first configuration employs a grid-forming converter (GFC) supported by a photovoltaic (PV) array and a battery energy storage system (BESS). The second configuration utilizes a GFC exclusively powered by a BESS. In the PV-based system, maximum power extraction is achieved through the incremental conductance (INC) algorithm, while the wind-driven doubly-fed induction generator (DFIG) uses a tip-speed ratio-based maximum power point tracking (MPPT) algorithm to optimize wind energy capture. The stator windings of the DFIG are synchronized with the local grid to ensure seamless integration. To maintain efficient microgrid operation, a robust control algorithm is essential. This research introduces an advanced control strategy designed to ensure smooth microgrid performance under dynamic conditions, including load connection and disconnection, variations in wind speed, and changes in solar insolation. The proposed approach enhances the reliability and stability of the microgrid, even in fluctuating environmental and operational scenarios.

The microgrid architecture and control strategies are initially validated through software simulations using the MATLAB/Simulink platform. Following promising results, a physical prototype of a microgrid is constructed, incorporating a wind driven doubly-fed induction generation (DFIG), a solar photovoltaic array, and a battery energy storage system (BESS). This prototype is subjected to extensive testing across various configurations, utilizing appropriate control algorithms to evaluate performance.

The simulated and experimental results are analyzed under a range of challenging conditions, including fluctuations in wind speed, solar insolation, unbalanced and balanced loads. Notably, the system demonstrates effective maximum power point tracking (MPPT) for wind and solar energy under normal conditions. Additionally, the microgrid's performance is assessed during both off-grid and grid-interactive operations, showcasing a smooth transition between these modes. The results highlight the capability of this multi-functional microgrid to maintain reliability and efficiency under diverse operational scenarios.

नवीकरणीय ऊर्जा की तीव्र प्रगति ने पिछले दशक में ऊर्जा क्षेत्र को गहराई से बदल दिया है। माइक्रोग्रिड, जो स्थानीय भार के साथ नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों को एकीकृत करता है, पर्यावरणीय प्रभावों को कम करते हुए बढ़ती वैश्विक ऊर्जा मांग को पूरा करने के लिए एक स्थायी समाधान प्रदान करता है। आमतौर पर वितरण नेटवर्क के पास स्थित, माइक्रोग्रिड ऑफ-ग्रिड और ग्रिड-कनेक्टेड दोनों मोड में प्रभावी ढंग से काम करने के लिए पावर कन्वर्टर्स का उपयोग करते हैं। प्रौद्योगिकी में प्रगति, सहायक नीतियों और कस्टम बिजली उपकरणों को अपनाने से माइक्रोग्रिड के लचीलेपन और विश्वसनीयता में वृद्धि हुई है, जिससे उनके प्रदर्शन में काफी वृद्धि हुई है। हालाँकि, नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों की अंतर्निहित अप्रत्याशितता अनियमित बिजली उत्पादन और मुख्य उपयोगिता ग्रिड के साथ जटिल एकीकरण जैसी चुनौतियाँ पेश करती है। इसके अलावा, पावर ग्रिड के भीतर माइक्रोग्रिड की बढ़ती तैनाती खराब बिजली कारक, स्थिरता संबंधी चिंताएं, बिजली की गुणवत्ता में गिरावट और जटिल बिजली प्रबंधन आवश्यकताओं जैसे मुद्दे लाती है। इन चुनौतियों से पार पाने के लिए, उन्नत सर्किट कॉन्फिगरेशन और परिष्कृत नियंत्रण एल्गोरिदम विकसित करना आवश्यक है जो माइक्रोग्रिड के कुशल और स्थिर संचालन को सुनिश्चित करते हैं। टिकाऊ और लचीले ऊर्जा भविष्य को सक्षम करने के लिए ये नवाचार महत्वपूर्ण हैं।

यह शोध कुशल ऊर्जा उपयोग के लिए डिज़ाइन की गई एक चर-गति, निश्चित-पिच पवन ऊर्जा उत्पादन प्रणाली (WEGS) के विकास पर जोर देता है। सिस्टम में दो वोल्टेज स्रोत कनवर्टर (वीएससी) हैं जो एक साझा डीसी लिंक के साथ बैक-टू-बैक कॉन्फिगरेशन में व्यवस्थित हैं। रोटार-साइड कनवर्टर (आरएससी) पवन ऊर्जा निष्कर्षण को अधिकतम करने के लिए जिम्मेदार है, जबकि ग्रिड-साइड कनवर्टर (जीएससी) उपयोगिता ग्रिड के साथ सुचारु एकीकरण सुनिश्चित करता है, सहायक सेवाओं सहित ग्रिड और स्थानीय भार में बिजली के प्रवाह का प्रबंधन

करता है। सौर ऊर्जा उत्पादन के लिए, सिस्टम को विशिष्ट अनुप्रयोग आवश्यकताओं के आधार पर एकल-चरण या दो-चरण कॉन्फ़िगरेशन में संचालित करने के लिए डिज़ाइन किया जा सकता है। प्राथमिक उद्देश्य चर-गति पवन टर्बाइन और सौर फोटोवोल्टिक सरणियों दोनों से कुशल ऊर्जा उत्पादन प्राप्त करना है। प्रमुख चुनौतियों में हवा की गति और सौर विकिरण में उतार-चढ़ाव के बावजूद लगातार बिजली उत्पादन बनाए रखना, साथ ही स्थिर और विश्वसनीय ग्रिड एकीकरण सुनिश्चित करना शामिल है।

यह अध्ययन स्थानीय ग्रिड बनाने के लिए दो अलग-अलग कॉन्फ़िगरेशन की खोज करता है। पहला कॉन्फ़िगरेशन एक फोटोवोल्टिक (पीवी) सरणी और एक बैटरी ऊर्जा भंडारण प्रणाली (बीईएसएस) द्वारा समर्थित ग्रिड-फॉर्मिंग कनवर्टर (जीएफसी) को नियोजित करता है। दूसरा कॉन्फ़िगरेशन विशेष रूप से BESS द्वारा संचालित GFC का उपयोग करता है। पीवी-आधारित प्रणाली में, अधिकतम बिजली निष्कर्षण वृद्धिशील संचालन (आईएनसी) एल्गोरिदम के माध्यम से प्राप्त किया जाता है, जबकि पवन-चालित डबल-फेड इंडक्शन जनरेटर (डीएफआईजी) टिप-स्पीड अनुपात-आधारित अधिकतम पावर पॉइंट ट्रैकिंग (एमपीपीटी) एल्गोरिदम का उपयोग करता है। पवन ऊर्जा कैप्चर को अनुकूलित करने के लिए। निर्बाध एकीकरण सुनिश्चित करने के लिए डीएफआईजी की स्टेटर वाइंडिंग्स को स्थानीय ग्रिड के साथ सिंक्रनाइज़ किया गया है। कुशल माइक्रोग्रिड संचालन को बनाए रखने के लिए, एक मजबूत नियंत्रण एल्गोरिदम आवश्यक है। यह शोध एक उन्नत नियंत्रण रणनीति पेश करता है जो गतिशील परिस्थितियों में सुचारु माइक्रोग्रिड प्रदर्शन सुनिश्चित करने के लिए डिज़ाइन की गई है, जिसमें लोड कनेक्शन और डिस्कनेक्शन, हवा की गति में बदलाव और सौर सूर्यातप में परिवर्तन शामिल हैं। प्रस्तावित दृष्टिकोण उतार-चढ़ाव वाले पर्यावरणीय और परिचालन परिदृश्यों में भी माइक्रोग्रिड की विश्वसनीयता और स्थिरता को बढ़ाता है।

माइक्रोग्रिड आर्किटेक्चर और नियंत्रण रणनीतियों को प्रारंभ में MATLAB/Simulink प्लेटफ़ॉर्म का उपयोग करके सॉफ़्टवेयर सिमुलेशन के माध्यम से मान्य किया जाता है। आशाजनक परिणामों के बाद, एक माइक्रोग्रिड का एक भौतिक प्रोटोटाइप बनाया गया है, जिसमें एक पवन चालित डबल-फेड इंडक्शन जेनरेशन (डीएफआईजी), एक सौर फोटोवोल्टिक सरणी और एक बैटरी ऊर्जा भंडारण प्रणाली (बीईएसएस) शामिल है। प्रदर्शन का मूल्यांकन करने के लिए उपयुक्त नियंत्रण एल्गोरिदम का उपयोग करते हुए, इस प्रोटोटाइप को विभिन्न कॉन्फ़िगरेशन में व्यापक परीक्षण के अधीन किया गया है।

सिमुलेटेड और प्रयोगात्मक परिणामों का विश्लेषण कई चुनौतीपूर्ण परिस्थितियों में किया जाता है, जिसमें हवा की गति और सौर सूर्यातप में उतार-चढ़ाव, असंतुलित और संतुलित भार शामिल हैं। विशेष रूप से, सिस्टम सामान्य परिस्थितियों में पवन और सौर ऊर्जा के लिए प्रभावी अधिकतम पावर प्वाइंट ट्रैकिंग (एमपीपीटी) प्रदर्शित करता है। इसके अतिरिक्त, ऑफ-ग्रिड और ग्रिड-इंटरैक्टिव संचालन दोनों के दौरान माइक्रोग्रिड के प्रदर्शन का मूल्यांकन किया जाता है, जो इन मोडों के बीच एक सहज संक्रमण को दर्शाता है। परिणाम विविध परिचालन परिदृश्यों के तहत विश्वसनीयता और दक्षता बनाए रखने के लिए इस बहु-कार्यात्मक माइक्रोग्रिड की क्षमता को उजागर करते हैं।