

इष्टतम फेजर मापन इकाई-स्थान निर्धारण और तुलनात्मक विश्लेषण Optimal Phasor Measurement Unit & Placement Determination and Comparative Analysis

रिचा¹, नेहा खुराना² एवं प्रीति प्रभाकर³

Richa¹, Neha Khurana² and Priti Prabhakar³

^{1,2}Department of Electrical Engineering, MDU, Rohtak, India

³Department of Electrical Engineering, GTUST, Hisar, India

¹richa.rs.uet@mdurohtak.ac.in, ²neha.kapoor@rediffmail.com, ³priti.prabhakar@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15564628>

सारांश

फेजर मेजरमेंट यूनिट्स (PMU), आधुनिक पावर सिस्टम के लिए महत्वपूर्ण है, जो निगरानी, संरक्षण एवं नियंत्रण के लिए समकालिक वास्तविक समय डाटा प्रदान करते हैं। सिस्टम की अवलोकन क्षमता सुनिश्चित करने, स्थापना लागत को कम करने और नेटवर्क की दक्षता और विश्वसनीयता में सुधार करने के लिए पीएमयू का इष्टतम स्थान निर्धारित करना महत्वपूर्ण है। यह शोध पत्र इष्टतम स्थान निर्धारण के लिए विभिन्न तकनीकों का तुलनात्मक विश्लेषण प्रस्तुत करता है। अध्ययन में पूर्णांक रैखिक प्रोग्रामन, ह्यूरिस्टिक एल्गोरिथ्म और मेटाह्यूरिस्टिक दृष्टिकोण, जैसे जेनेटिक एल्गोरिथ्म और कण झुंड अनकूलन (PSO) जैसे पारंपरिक तरीके शामिल हैं। कम्प्यूटेशनल दक्षता, समाधान की गुणवत्ता, विस्तार क्षमता और नेटवर्क टोपोलॉजी के अनुकूलन क्षमता विश्लेषण में इन तकनीकों का मूल्यांकन करते हैं। पारंपरिक तरीके, जैसे पूर्णांक रैखिक प्रोग्रामन (ILP), सटीक समाधान देते हैं, लेकिन वे अक्सर उच्च गणनीय होते हैं और सीमित विस्तार क्षमता देते हैं। ह्यूरिस्टिक तरीके त्वरित समाधान देते हैं, लेकिन विश्व व्यापी इष्टतमता हासिल करने में असफल हो सकते हैं। मेटाह्यूरिस्टिक दृष्टिकोण जैसे GA और PSO समाधान की गुणवत्ता और कम्प्यूटेशनल प्रयास को संतुलित करते हैं, और बड़े और जटिल नेटवर्क में बेहतर काम करते हैं। यह पाया गया है कि सार्वभौमिक रूप से कोई एक तकनीक बेहतर नहीं है; बल्कि, सिस्टम की विशिष्ट बाधाओं और आवश्यकताओं पर सबसे अच्छा उपाय निर्धारित होता है। मेटाह्यूरिस्टिक और कृत्रिम बुद्धिमत्ता आधारित तरीके बड़े और जटिल नेटवर्क के लिए बेहतर हैं, लेकिन ILP और ह्यूरिस्टिक तरीके छोटे से मध्यम आकार के नेटवर्क के लिए बेहतर हैं। इस शोध पत्र ने ILP का उपयोग करके पीएमयू का सर्वश्रेष्ठ स्थान निर्धारित किया है। इस शोध पत्र में डेपथ-फर्स्ट विधि का उपयोग करके आदर्श पीएमयू स्थान का निर्धारण किया गया है, जो ऊर्जा-प्रवाह विश्लेषण टूलबॉक्स (PSAT) है।

Abstract

Phasor Measurement Units (PMUs) are crucial for modern power systems, providing synchronized real-time data for monitoring, protection and control. Determining the optimal placement of PMUs is essential to ensure system observability, minimize installation costs, and improve network reliability and efficiency. This paper presents a detailed comparative analysis of various techniques for optimal PMU placement. The study includes traditional methods such as Integer Linear Programming (ILP), heuristic algorithms and metaheuristic approaches like Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO). The analysis evaluates these techniques based on various criteria-computational efficiency, solution quality, scalability, and adaptability to different network topologies. While

traditional methods like ILP provide precise solutions, they often come with high computational costs and limited scalability. Heuristic methods offer quick solutions but may fail to achieve global optimality. Metaheuristic approaches such as GA and PSO balance solution quality and computational effort and perform robustly in large and complex networks. It was found that no single technique is universally superior, rather, the most suitable method depends on the specific requirements and constraints of the system. ILP and heuristic methods are effective for small to medium-sized networks, while metaheuristic and AI-based approaches are more suitable for large and complex networks. In this paper) Optimal PMU placement is determined using ILP Ideal PMU placement is determined using the depth-first method with the Power System Analysis Toolbox.

मुख्य शब्द: फेजर मेजरमेंट यूनिट्स, पावर सिस्टम अवलोकन क्षमता, इष्टतम पीएमयू प्लेसमेंट, पूर्णांक रैखिक प्रोग्रामन, हीयूरिस्टिक एल्गोरिथ्म, कण झुंड अनुकूलन, कृत्रिम बुद्धिमत्ता।

Key Words: Phasor Measurement Units (PMUs), Power System Observability, Optimal PMU Placement, Integer Linear Programming (ILP), Heuristic Algorithms, Particle Swarm Optimization (PSO), Artificial Intelligence (AI).

परिचय

अंतर्राष्ट्रीय जीवन स्तर में सुधार और तकनीक में सुधार के कारण बिजली की मांग बढ़ रही है। इस मांग को पूरा करने के लिए अधिक विद्युत उत्पादन की आवश्यकता होगी। हालाँकि, जीवाश्म ईंधनों की सीमित उपलब्धता, पर्यावरणीय खतरे और नए बिजली संयंत्रों के निर्माण में आने वाली चुनौतियों के कारण, नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों को ग्रिड में एकीकृत करने के लिए मौजूदा पारेषण और वितरण बुनियादी ढांचे को कुशल तरीके से नियंत्रित करना आवश्यक है। सिस्टम की क्षमता का आकलन करने के लिए सटीक माप उपकरणों की स्थापना आवश्यक है। वर्तमान में पर्यवेक्षी नियंत्रण और स्काडा, एक डेटा अधिग्रहण प्रणाली, काम करते हैं। स्काडा का सबसे आम कार्य पावर ग्रिड की स्थिति का अनुमान लगाना है, जो धीमी और असिंक्रोनाइज्ड मापों पर आधारित है। स्काडा पर आधारित मापों में कुछ सीमाएँ और त्रुटियाँ होती हैं, जैसे साइकिल, संचार पूर्वाग्रह और माप में देरी। स्काडा की समस्याओं और सीमाओं को दूर करने के लिए व्यापक क्षेत्र निगरानी सुरक्षा और नियंत्रण वैम्पाक का प्रस्ताव किया गया है। वैम्पाक का मुख्य भाग फेजर मापने वाला उपकरण है, वरिग्रिड में वोल्टेज और करंट को कंप्यूट करने और सिंक्रोनाइज्ड फेजर मापने की क्षमता है। पीएमयू जिनके पास सटीक संदर्भ समय संकेत हैं, सटीकता और प्रामाणिकता हासिल कर सकते हैं। वर्तमान में वोल्टेज और करंट फेजर की सिंक्रोनाइज्ड माप की जा सकती है। पावरग्रिड की निगरानी में सुधार के लिए पीएमयू का उपयोग तेजी से बढ़ा है।^[2, 3]

आधुनिक पावर ग्रिड प्रबंधन में फेजर मापने वाले यूनिट्स (PMU) वोल्टेज और करंट फेजर जैसी विद्युत मात्राओं को रियल-टाइम, सिंक्रोनाइज्ड रूप से मापने की क्षमता बहुत महत्वपूर्ण है। PMU समय-संशोधन के लिए जीपीएस का उपयोग करते हैं, जो पारंपरिक स्काडा सिस्टम से अलग है, जिससे उच्चगति और प्रामाणिकता से ग्रिड की स्थिति की सटीक निगरानी संभव है।^[3, 5]

स्काडा प्रणालियों पर PMU के लाभ

रियल-टाइम डेटा: PMU रियल-टाइम डेटा प्रदान कर सकते हैं, जो स्काडा सिस्टमों की धीमी, विलंबित मापों की तुलना में ग्रिड की स्थिति की अधिक तत्काल जानकारी देते हैं।^[6]

उच्च निष्ठा: PMU में जीपीएस आधारित सिंक्रोनाइजेशन सुनिश्चित करता है कि विभिन्न स्थानों से माप समय-रेखांकित हैं, जिससे ग्रिड की स्थिति का अधिक सटीक विश्लेषण संभव है।^[7]

सुधारित दृष्टि: PMU पावरग्रिड की बेहतर दृश्यता देते हैं, जिससे व्यवधानों और परिचालन चुनौतियों के प्रति तेज और अधिक प्रभावी प्रतिक्रियाएँ संभव होती हैं।^[8]

चुनौतियाँ और अनुकूलन

हालाँकि PMU महत्वपूर्ण लाभ प्रदान करते हैं, उनकी उच्च लागत एक अनुकूलित दृष्टिकोण की आवश्यकता बनाती है। उद्देश्य कम से कम PMU के साथ ग्रिड की पूरी या लगभग पूरी दृश्यता प्राप्त करना है, जिसे रणनीतिक रूप से स्थापित किया जाता है।

सर्वश्रेष्ठ स्थान: PMU सर्वोत्तम स्थानों का पता लगाना ताकि ग्रिड दृश्यता को अधिकतम और अतिरेक को कम किया जा सके।

लाभ-नुकसान विश्लेषण: बेहतर ग्रिड निगरानी और नियंत्रण के फायदों को PMU के खर्चों के साथ संतुलित करना।

मौजूदा सिस्टम्स के साथ एकीकरण: सुनिश्चित करना कि PMU स्काडा सिस्टम्स और अन्य बुनियादी ढांचे के साथ पूरक हैं ताकि एक व्यापक निगरानी समाधान प्रदान किया जा सके।

पावर सिस्टम में PMU के एकीकरण ने मॉनिटरिंग और नियंत्रण तंत्र की क्षमताओं को काफी बढ़ा दिया है। PMU उच्च-रिजॉल्यूशन, समय-सिंकड मापन प्रदान करते हैं, जिससे पावर सिस्टम में बेहतर स्थिति जागरूकता और स्थिरता की सुविधा मिलती है। हालांकि, PMU तैनाती की लागत और जटिलता के कारण, उनके इष्टतम प्लेसमेंट को निर्धारित करना महत्वपूर्ण है। PMU का उपयोग ग्रिड की विश्वसनीयता, स्थिरता और दृष्टव्यता बढ़ाने के लिए किया जा रहा है। उच्च लागत के कारण, PMU को अनुकूलित स्थानों पर स्थापित किया जा रहा है ताकि न्यूनतम इकाइयों के साथ अधिकतम नेटवर्क दृश्यता प्राप्त हो सके। शून्य इंजेक्शन बसों और एक-लाइन आकस्मिकताओं को हल करने पर विभिन्न शोध और पायलट परियोजनाओं का ध्यान है। भारत में फेजर मेजरमेंट यूनिट्स का प्लेसमेंट ग्रिड की निगरानी और प्रबंधन तेजी से सुधर रहा है। हाल के वर्षों में, पावर सप्लाय सिस्टम को पूरी तरह से अवलोकनीय बनाने के लिए न्यूनतम और इष्टतम PMU प्लेसमेंट खोजने के लिए कई तरीके प्रस्तुत किए गए हैं, जैसे कि सिमुलेटेड एनीलिंग, जेनेटिक एल्गोरिथ्म, टैबू सर्च और कण झुंड अनुकूलन।

इस शोध पत्र में PMU के सर्वोत्तम प्लेसमेंट के लिए कई तकनीकों की समीक्षा और तुलना की गई है, साथ ही उनकी प्रभावशीलता और कम्प्यूटेशनल दक्षता पर प्रकाश डाला गया है। खंड 3 में ओपीपी समस्या और इसके विपरीत परिणामों का सूत्रीकरण है। इसमें न्यूनतम लागत पर उद्देश्य फलन की पूर्ण अवलोकन क्षमता सुनिश्चित करना शामिल है। खंड 4 और 5 में इष्टतम PMU प्लेसमेंट के लिए उपयोग की जाने वाली कई क्लासिकल और हीयूरिस्टिक तकनीकों का तुलनात्मक

विश्लेषण प्रस्तुत किया गया है। विवरण और तुलनात्मक विश्लेषण दोनों इसमें शामिल हैं। PMU प्लेसमेंट के परिणाम खंड 6, 7 में प्रयुक्त कार्य प्रणाली, अनुभाग और केस स्टडीज के बारे में बताया गया है। इसमें निम्नलिखित मुद्दों का समावेश केस स्टडीज और PMU प्लेसमेंट के परिणामों का विवरण प्रदान करता है। इसमें खंड 8 में प्रस्तुत शोध पत्र का निष्कर्ष शामिल है।

साहित्यिक समीक्षा

माजी एवं अन्य (2017)^[11] ने स्मार्ट ग्रिड्स में PMU स्थानांतरित करने के लिए एक्सपोनेन्शियल बाइनरी PSO एल्गोरिथ्म का उपयोग किया। कुमारी एवं अन्य (2017)^[12] ने बाइनरी पीएसओ का उपयोग विभिन्न अनुकूलन उद्देश्यों और बाधाओं पर विचार करते हुए किया गया। रहमान एवं अन्य (2017)^[13] ने संशोधित बाइनरी PSO के साथ उत्परिवर्तन रणनीतियों को एकीकृत करके PSO प्लेसमेंट समाधान की मजबूती और दक्षता में सुधार किया। ली एवं अन्य (2018)^[14] ने पूर्ण प्रणाली की निरीक्षण और गलती सहिष्णुता सुनिश्चित करने के लिए एक आईएलपी आधारित अनुकूल पीएसओ प्लेसमेंट मॉडल प्रस्तावित किया। लाओउइद एवं अन्य (2019)^[15] ने शक्ति प्रणालियों में निरीक्षण और आकस्मिकता की स्थिति के लिए हाइब्रिड PSO-GSA एल्गोरिथ्म प्रस्तुत किया। मीनाक्षी देवी एवं अन्य (2020)^[16] ने PMU प्लेसमेंट रणनीतियों को बेहतर बनाने के लिए जेनेटिक एल्गोरिथ्म और न्यूनतम स्पैनिंग ट्री तकनीक का एकीकरण किया। कजमा एवं अन्य (2023)^[17] ने हाइब्रिड एल्गोरिथ्म का उपयोग, अनिश्चितता को ध्यान में रखते हुए, अरैखिक बीजीय अवकल समीकरण मॉडल का उपयोग किया। खोदादी अरपाना एवं अन्य (2023)^[18] ने PMU प्लेसमेंट में व्यावहारिक समस्याओं को ध्यान में रखते हुए एक व्यापक दृष्टिकोण प्रस्तुत किया। मोहमद एच. कजमा एवं अन्य (2023)^[19] ने ग्राफ-थ्योरिटिक दृष्टिकोण का उपयोग करके अनुकूल PMU प्लेसमेंट की समस्याओं का पुनरावलोकन किया, जिसमें दृढ़ अनुमानों और गैर-गौसियन शोर शामिल थे।

फेजर मेजरमेंट यूनिट्स का उपयोग पावर सिस्टम की अवलोकन क्षमता, निगरानी और नियंत्रण के क्षेत्र में तेजी से बढ़ रहा है, जो इस अध्ययन को प्रेरित करता है। हालांकि, इस अध्ययन को प्रेरित करने वाले कई महत्वपूर्ण ज्ञान के अंतर अभी भी मौजूद हैं।

विभिन्न तरीकों जैसे पूर्णांक रैखिक प्रोग्रामन, हीयूरिस्टिक एल्गोरिथ्म और मेटाह्यूरिस्टिक दृष्टिकोणों

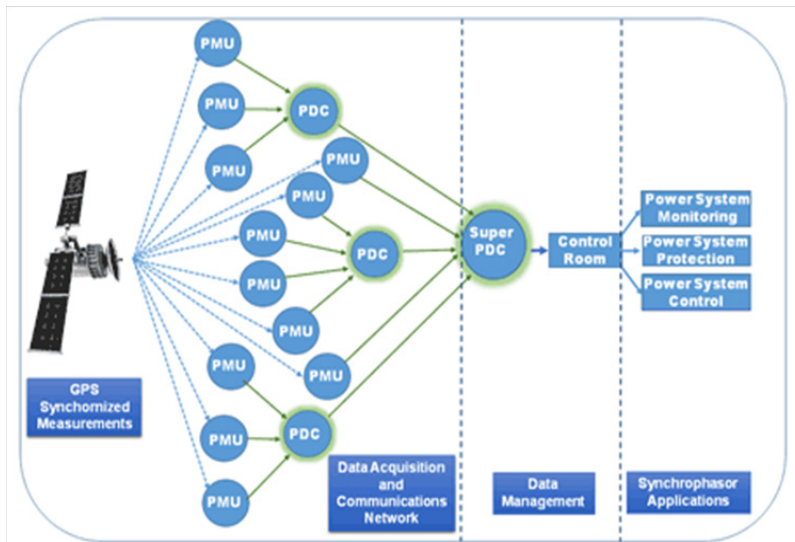
(जैसे GA और PSO) PMU प्लेसमेंट की इष्टतमता का व्यापक तुलनात्मक विश्लेषण नहीं किया जा सकता है। इस क्षेत्र में अध्ययन तुलनात्मक प्रभावशीलता की व्यापक समझ से दूर है और मुख्य रूप से व्यक्तिगत तकनीकों पर केंद्रित है। ज्यादातर शोध छोटे से मध्यम आकार के नेटवर्क पर केंद्रित हैं, लेकिन बड़े और जटिल नेटवर्क के लिए उपयुक्त तरीकों की पहचान करना चुनौतीपूर्ण बना हुआ है। बड़े नेटवर्क में मेटाह्यूरीस्टिक और AI आधारित दृष्टिकोणों को प्रभावी ढंग से लागू करने के लिए और अधिक शोध की आवश्यकता है।

पारंपरिक तरीके जैसे ILP सटीक समाधान देते हैं, लेकिन इनमें उच्च कम्प्यूटेशनल लागत और सीमित विस्तार क्षमता की सीमा है। दूसरी ओर, हीयूरीस्टिक तरीके त्वरित समाधान देते हैं लेकिन विश्वव्यापी सर्वोत्तम नहीं होते। वर्तमान अध्ययन में PMU प्लेसमेंट और वास्तविक समय निगरानी के व्यावहारिक कार्यान्वयन से जुड़े प्रश्नों को हल करना आवश्यक है। PMU प्लेसमेंट को बेहतर बनाने के लिए व्यावहारिक सीमाओं और संचार चैनलों की उपलब्धता को ध्यान में रखना महत्वपूर्ण है। हाइब्रिड दृष्टिकोण अभी भी शुरुआत की ओर है, जो विभिन्न तकनीकों की ताकतों को एकीकृत करता है। PMU प्लेसमेंट को बेहतर बनाने के लिए एक व्यापक और प्रभावी हाइब्रिड दृष्टिकोण बनाया जाना चाहिए और इसका अध्ययन किया जाना चाहिए।

इस अध्ययन का उद्देश्य विभिन्न तकनीकों का तुलनात्मक विश्लेषण करना था, बड़े और जटिल नेटवर्क के लिए किस तरह की विधियों को चुनना, कम्प्यूटेशनल लागत और समाधान की गुणवत्ता का संतुलन बनाना, और एक प्रभावी हाइब्रिड दृष्टि कोण बनाना।

ओपीपी समस्या का निर्माण

उस बस पर स्थापित PMU एक उपकरण है जो वोल्टेज और करंट फेजर मापता है। फेजर डेटा कंसट्रक्टर नामक इकाई को जीपीएस द्वारा समय द्वारा मापे गए और PMU के माध्यम से मुहर बंद किए गए फेजर संकेत भेजे जाते हैं। चित्र 1 में वाइड एरिया मॉनिटरिंग, सुरक्षा और नियंत्रण (वैम्पाक) प्रणाली के सभी हिस्से दिखाए गए हैं, जिसमें जीपीएस से जुड़े PMU भी शामिल हैं। पीडीसी लक्ष्य कच्चे फेजर डेटा को एकत्र करना और समय के साथ सिंक्रोनाइज करना है ताकि समय के साथ सुसंगत वास्तविक समय की जानकारी प्राप्त की जा सके। सिस्टम सिग्नल प्रोसेसर के PMU फेजर को उपयोगी डेटा में परिवर्तित करता है। मानव-मशीन इंटरफेस ऑपरेटर यह जानकारी देख सकता है, जिससे वह ग्रिड की महत्वपूर्ण स्थिति को आसानी से मॉनिटर और रिकॉर्ड कर सकता है और भविष्य में सुधार के लिए उपाय कर सकता है। नेगेश एवं अन्य^[20] में PMU प्लेसमेंट के नियमों पर चर्चा हुई है, जिसमें शाखा करंट और स्थित बस पर PMU के लिए बस वोल्टेज का निर्धारण शामिल है। PMU गणना किए गए बस स्थानों पर रखने से ऑपरेटर नेटवर्क के कामकाज को पूरी तरह से देख सकता है। ये PMU हर बस में वोल्टेज फेजर मान और बस से जुड़ी हर शाखा में करंट फेजर मान माप सकते हैं। यही कारण है कि ओपीपी का लक्ष्य नेटवर्क की दृश्यता को बढ़ाना या उसे पूरी तरह से दृष्टव्य बनाना है; इसका मतलब यह नहीं है कि PMU की संख्या को कम किया जाए, बल्कि स्थापित PMU की संख्या को अनुकूलित किया जाए।



चित्र 1. व्यापक क्षेत्र निगरानी प्रणाली

ओपीपी समस्या का मुख्य उद्देश्य न्यूनतम कुल PMU की संख्या और पावर सिस्टम में उनके उपयुक्त स्थानों को निर्धारित करना है ताकि संपूर्ण नेटवर्क की अवलोकन क्षमता सुनिश्चित की जा सके। इसलिए, उद्देश्य फलन को इस प्रकार गणितीय रूप से प्रस्तुत किया जा सकता है।

$$Z = \min \sum_{k=1}^{Mbus} x_k \quad (1)$$

$$\text{subject to } B.X \geq 1 \quad (2)$$

जहाँ Z कुल PMU की संख्या को दर्शाता है, $Mbus$ सिस्टम बसों की संख्या है और B एक द्विआधारी (बाइनरी) कनेक्टिविटी मैट्रिक्स है जिसकी प्रविष्टियों को निम्नलिखित प्रकार से परिभाषित किया गया है, x_k एक द्विआधारी (बाइनरी) चर है जहाँ $x_k=1$ होता है यदि उस पर PMU स्थापित है, और $x_k=0$ होता है यदि वह स्थापित नहीं है। इस प्रकार, समस्या यह है कि न्यूनतम x_k वाले समाधान वेक्टर को निर्धारित करना है और जो समीकरण 1 को संतुष्ट करता है। संयम अनुकूलन फलन को बाइनरी कनेक्टिविटी मैट्रिक्स (मैट्रिक्स B) के माध्यम से निर्धारित किया गया था। यह मैट्रिक्स ग्रिड के लिए बस कनेक्टिविटी डेटा प्रदान करता है। प्रस्तावित मैट्रिक्स को निम्नानुसार निर्धारित किया गया है। इस प्रकार, समीकरण 1 को तीन महत्वपूर्ण मामलों को ध्यान में रखते हुए लिखा गया है— (1) केवल माप, (2) कुछ बसें पावरइंजेक्शन नहीं करती हैं (निष्क्रिय माप)। PMU माप के साथ इंजेक्शन बस (जैसे, शून्य इंजेक्शन बस), और (3) केवल PMU माप। वर्तमान प्रवाह इंजेक्शन PMU प्लेसमेंट समस्या को आगे संयम और अनुकूलन फलन पर सीमाओं के साथ सूत्रबद्ध किया जा सकता है, और इनमें से कुछ संयमों को निम्नलिखित कार्यों में संबोधित किया गया है—शून्य इंजेक्शन बसों के प्रभाव पारंपरिक मापों के प्रभाव, एकल या बहु-PMU हानि आकस्मिकताएं, एकल शाखा आउटेज, एकल-लाइन डिस्कनेक्शन की आकस्मिकता, PMU चैनल सीमा का प्रभाव, और एकल-PMU हानि।

गणितीय प्रोग्रामन विधियाँ

डेपथ फर्स्ट विधि

PMU स्थानन के लिए “डेपथ फर्स्ट” प्रक्रिया, उद्योग नेटवर्क की प्रणाली की जांच के लिए एक व्यवस्थित प्रक्रिया है। इस प्रक्रिया में, अन्वेषण एक विशिष्ट बिंदु से शुरू होता है और प्रत्येक शाखा को

एक नेटवर्क के अन्वेषण के रूप में देखा जाता है, जिसे ठीक से बताने के लिए वापस जाना जाता है। यह लक्ष्य की ओर बढ़ता है, जो कम PMU के साथ नेटवर्क का ढांचा बनाना है। डेपथ-फर्स्ट विधि में PMU स्थानन के लिए निर्देश निम्नलिखित हैं:

1. एक विशिष्ट नोड से शुरू करें, उस नोड का चयन करें जो स्थान बताता है जहाँ से खोज शुरू होगी।
2. प्रत्येक शाखा में खोज पहले नोड से नेटवर्क की प्रत्येक शाखा का अध्ययन करें और इसे जारी रखें। संभव होने पर हर शाखा पर पहुँचें और फिर वापस जाएँ।
3. खोजे गए नोडों को चिह्नित करें अनुसंधान के दौरान पाए गए नोडों को चिह्नित करें। इससे पता चलता है कि नेटवर्क के किस हिस्से को पहले से ही कवर किया गया है।
4. स्थापना को ध्यान में रखें: प्रत्येक नोड के लिए PMU स्थापना की उपयुक्तता का मूल्यांकन करें, जो नेटवर्क की अवलोकनीयता, अतिरिक्तता और महत्वपूर्णता पर निर्भर है।
5. आवश्यकता होने पर वापस आएं यदि कोई डेड-एंड मिलता है या सभी संभावित पथ किसी नोड से खोजे गए हैं, तो पिछले नोड पर वापस जाएँ और वहाँ से खोज जारी रखें।
6. प्रसन्न शक्ति के लिए आगे बढ़ें। जब तक नेटवर्क का पर्याप्त कवरेज नहीं मिल जाता, डेपथ-फर्स्ट अन्वेषण और PMU स्थापना प्रक्रिया को जारी रखें।

पूर्णांक रैखिक प्रोग्रामन

ILP एक गणितीय अनुकूलन प्रणाली है जिसका उद्देश्य सबसे अच्छा PMU प्लेसमेंट समाधान खोजना है। MATLAB आधारित ILP कार्यक्रम उद्देश्य फलनों और बाधाओं को शामिल करता है। लक्ष्य फलन कम खर्च पर अधिक देखभाल रुकावटें-प्रत्येक नोड को सीधे PMU द्वारा मापा जा सकता है या किसी कनेक्टेड नोड से देखा जा सकता है। पौडेल एवं अन्य^[5] के माध्यम से बिजली ग्रिड पर पूरी तरह से निगरानी की जा सकती है। शून्य इंजेक्शन प्रतिबंधों का उदाहरण ILP संरचना है। परिणाम निम्नलिखित बताते हैं— (1) पावर सिस्टम की पूरी तरह से निगरानी करने के लिए की प्रभावी गणना की जा सकती है। (2) कम्प्यूटेशनल रूप से कुशल कनेक्टिविटी मैट्रिक्स पर आधारित संशोधन विधि शून्य इंजेक्शन बसों वाले सिस्टम में आसानी से लागू की जा सकती है। (3)

सिंगल-लाइन आउटेज पर विचार करने से PMU अधिक होते हैं। एल्गोरिथ्म को मानक-बस के लिए वातावरण में टेस्ट किया गया था।

पूर्णांक वर्गमूल प्रोग्रामन: विद्युत ग्रिड में मापन दक्षता को बढ़ाने और कुल PMU की संख्या को कम करने के लिए संदर्भ ने IQP विधि लागू की। इसलिए, प्रस्तावित OPP प्रणाली में पारंपरिक मापन भी प्रयोग किया जा सकता है। MATLAB में प्रस्तावित अनुकूलन एल्गोरिथ्म का अनुकरण और परीक्षण IEEE 14-बस और 30-बस मानक परीक्षण प्रणालियों से किया गया था। इससे दोनों सामान्य परिस्थितियों और सिंगल-लाइन (या सिंगल-PMU) संचालन परिस्थितियों में प्रणालियों की पूर्ण अवलोकनीयता साबित हुई^[21]

हीयूरिस्टिक एल्गोरिथ्म

समस्याओं को हल करने के लिए अनुभव-आधारित तकनीकें हीयूरिस्टिक एल्गोरिथ्म (अनुमानात्मक गणनाएं) का उपयोग किया जाता है। ये एल्गोरिथ्म विशेष रूप से उन समस्याओं के लिए उपयोगी हैं जिनके लिए पारंपरिक गणनात्मक विधियां बहुत जटिल या बहुत समय लेती हैं। हीयूरिस्टिक एल्गोरिथ्म का मुख्य उद्देश्य त्वरित और पर्याप्त समाधान प्राप्त करना है, हालांकि वे हमेशा सबसे अच्छा या सर्वोत्तम समाधान नहीं देते।

अनुभव आधारित एल्गोरिथ्म- ये एल्गोरिथ्म पहले से प्राप्त ज्ञान और अनुभव का उपयोग करके समस्याओं को सुलझाते हैं।

जल्दी समाधान- ये कठिन समस्याओं का तुरंत समाधान देते हैं।

समय का बचाव- ये पारंपरिक उपायों की तुलना में कम समय में समाधान देते हैं।

आसान उपयोग- इन्हें समझना और लागू करना अपेक्षाकृत आसान है।

हीयूरिस्टिक एल्गोरिथ्म का उदाहरण

1. **ग्रीडी एल्गोरिथ्म-** ये एल्गोरिथ्म हर कदम पर सबसे अच्छा संभव विकल्प चुनते हैं, उम्मीद करते हुए कि अंत में एक अच्छा समाधान मिलेगा।

2. **जेनेटिक एल्गोरिथ्म-** ये एल्गोरिथ्म क्रॉसओवर, म्यूटेशन और चयन जैसे जीव विज्ञान के विकास के सिद्धांतों पर आधारित हैं।

3. **संयुक्त एनीलिंग-** ये एल्गोरिथ्म प्रसंभाव्य तकनीकों का उपयोग करते हैं और उष्मागतिकी के

सिद्धांतों पर आधारित हैं।

4. **टैबू खोज-** यह एल्गोरिथ्म पहले से ही ज्ञात असफलताओं से बचने के लिए स्मृति स्ट्रक्चर का उपयोग करता है, जो संभावित समाधान के स्थान को खोजता है।

जेनेटिक एल्गोरिथ्म: एक लोकप्रिय अनुकूली खोज उपकरण है जो समाधान खोजने के लिए प्राकृतिक विकास प्रक्रिया की नकल कर सकता है। इसे प्रक्रिया की खोज और अनुकूलन समस्याओं में सबसे अच्छा परिणाम प्राप्त करने के लिए प्रयोग किया जाता है। सिस्टम इंजीनियरिंग, प्रबंधन विज्ञान और संचालन इंजीनियरिंग अनुसंधान जैसे क्षेत्रों में विद्यार्थियों और विशेषज्ञों की रुचि बढ़ी है क्योंकि जेनेटिक एल्गोरिथ्म का उपयोग इंजीनियरिंग में महत्वपूर्ण समस्याओं को हल करने में किया जाता है। अकाचुकु एवं अन्य^[22] ने जेनेटिक एल्गोरिथ्म को मैप-रिड्यूस के साथ एकीकृत किया। जो समानांतर कम्प्यूटिंग की अनुमति देते हैं। मैप-रिड्यूस भी फिटनेट कन्वर्जेंस जैसे और स्केलेबिलिटी को बेहतर बनाता है। और अक्सर हडूप कंप्प्यूटिंग क्लस्टरों पर ओपीपी निर्धारित करने के लिए उपयोग किया जाता है। IEEE 14-नोड, IEEE 118-नोड और Wp 2383-नोड जैसे कई परीक्षण प्रणालियों ने मैप-रिड्यूस की प्राप्यता और प्रदर्शन को सत्यापित किया है। परिणामों से पता चलता है कि मैप-रिड्यूस स्थापित PMU की संख्या, समाधान की बहुलता, सटीकता और यथार्थता में महत्वपूर्ण लाभ प्रदान करता है।^[23]

टैबू खोज: इस प्रक्रिया में, पुनरावर्ती टैबू खोज (RTS) का उपयोग किया जाता है ताकि PMU स्थापना के लिए सबसे अच्छा स्थान निर्धारित किया जा सके। प्रत्येक RTS पुनरावृत्ति की शुरुआत में, सामान्य टैबू खोज प्रक्रिया का प्रयोग किया जाता है, जिसमें पहले निष्पादन से प्राप्त सबसे अच्छा समाधान का उपयोग किया जाता है। RTS सबसे अच्छी TS प्रारंभ योजना है क्योंकि TS विधि की सफलता दर उच्च है। प्रस्तावित RTS एल्गोरिथ्म को कई IEEE मानक परीक्षण प्रणालियों ने सत्यापित किया है, जिनमें बस प्रणालियां 14, 30, 57 और 118 शामिल हैं। साथ ही, RTS एल्गोरिथ्म के परिणामों को अन्य OPP एल्गोरिथ्म से तुलना की गई है, जिससे पता चलता है कि RTS एल्गोरिथ्म बिजली ग्रिड में स्थापित PMU की कुल संख्या को कम करता है,

जो पहले की तकनीकों की तुलना में समान या अधिक पीएमयू की आवश्यकता हो सकती है।^[24]

परागण एल्गोरिथ्म

फूल परागण एल्गोरिथ्म, एक नवीनतम अनुकूलन प्रणाली, हसनेन एवं अन्य^[25] ने प्रस्तुत किया था। इस प्रणाली का उद्देश्य सर्वोत्तम स्थानांतरण समस्या को हल करना है। यांग ने FPA बनाया, जो फूल वाले पौधों की परागण प्रक्रिया से प्रेरित होकर बहुउद्देश्यीय अनुकूलन के लिए बढ़ा दिया गया है। इस दृष्टिकोण का लक्ष्य सिस्टम की पूर्ण अवलोकनीयता प्राप्त करने के लिए आवश्यक PMU की संख्या को कम करना और सिस्टम बसों पर मापन पुनरावृत्ति को अधिकतम करना है। IEEE 14, 30, 57 और 118 बस परीक्षण प्रणालियों ने इस प्रक्रिया की जांच की, New England 39 बस परीक्षण प्रणाली, 49 बस कैनाल नेटवर्क परीक्षण प्रणाली; पश्चिमी डेल्टा नेटवर्क मिस्स में 52 बस परीक्षण प्रणाली पर काम कर रहा है। इस प्रक्रिया के परिणामों को बाइनरी पार्टिकल स्वार्म ऑप्टिमाइजेशन, ग्रीडी एल्गोरिथ्म, एकमात्र वर्टेक्स और ILP बाइनरी से तुलना की गई है।

सिम्युलेटेड एनीलिंग: OPP एक नवीन दो-चरण अनुकूलन एल्गोरिथ्म का उपयोग किया गया है, जो पूर्व स्थापित मापन प्रणाली के साथ पूरी तरह से अवलोकनीयता प्रदान करता है, जैसा कि आर्ट्स एवं अन्य^[26] में बताया गया है। ताकि बिजली प्रणाली की देखभाल को बढ़ाया जा सके, अनुकूलन समस्या को पूर्व स्थापित PMU और सामान्य संचालन स्थिति के तहत बनाया गया था। बाद में, प्रक्रिया की विश्वसनीयता में सुधार करने के लिए एकल-लाइन बिजली विफलता, एकल-बस बिजली विफलता और अन्य व्यावहारिक परिस्थितियों का विश्लेषण किया जाता है। यह सुनिश्चित करने के लिए कि कम से कम PMU स्थापित हों, पहले न्यूनकरण मॉडल का उपयोग किया जाता है। पहले, मापन की पुनरावृत्ति को समायोजित करने के लिए सिम्युलेटेड एनीलिंग का इस्तेमाल किया गया था। बाद में, इस प्रक्रिया की विश्वसनीयता में सुधार करने के लिए एकल-लाइन बिजली विफलता, एकल-बस बिजली विफलता और अन्य व्यावहारिक परिस्थितियों का विश्लेषण किया जाता है। ताकि कम से कम PMU स्थापित हों, न्यूनकरण मॉडल के साथ उत्तल प्रोग्रामिंग लागू किया जाता है। पहले, मापन की पुनरावृत्ति को समायोजित करने के

लिए सिम्युलेटेड एनीलिंग का इस्तेमाल किया गया था। सिस्टम दृश्यता पर शून्य इंजेक्शन बस के प्रभाव पर भी विचार किया गया है, जिससे स्थापित PMU की संख्या को पूर्ण अवलोकनीयता पर बिना किसी बड़े प्रभाव के कम किया जा सके। प्रस्तावित तकनीक की सुसंगतता, दक्षता और प्रभावशीलता को विभिन्न IEEE मानक-बस प्रणालियों ने सत्यापित किया है। वर्तमान नियमित मापन इकाइयों के साथ PMU का सर्वोत्तम संयुक्त प्लेसमेंट प्रदान करने के लिए एक अतिरिक्त अध्ययन में बहु-चरण सिम्युलेटेड एनीलिंग प्रणाली का उपयोग किया गया है। विभिन्न चरणों में ऊपर की ओर सिम्युलेशन के आधार पर, यह विधि अन्य पारंपरिक सिम्युलेटेड एनीलिंग एल्गोरिथ्म की तुलना में तेज है और इससे सर्वोत्तम समाधान का पता लगाया जा सकता है।^[27]

स्पैनिंग ट्री सर्च: यहाँ, स्पैनिंग ट्री सर्च तकनीक और ट्री सर्च एल्गोरिथ्म को एक साथ मिलाकर, न्यूनतम चैनल और बहु-चैनल PMU को ध्यान में रखते हुए OPP समस्या के समाधान को अधिकतम देखने योग्य बनाया गया है। इस अध्ययन में पावर ग्रिड में स्थापित PMU की कुल संख्या पर अवलोकनीयता की गहराई का अध्ययन किया गया है। विद्युत ग्रिड ग्राफ बनाने के लिए स्पैनिंग ट्री दृष्टिकोण का उपयोग किया गया, और PMU के सबसे अच्छे स्थान को खोजने के लिए वृक्ष खोज विधि का उपयोग किया गया। इसके अलावा, न्यूनतम PMU चैनलों की पहचान करने की प्रक्रिया में भी सुधार हुआ है। IEEE मानक-बस परीक्षण प्रणालियों ने MATLAB वातावरण में इस तकनीक की पुष्टि की ताकि समस्या के उद्देश्य को पूरा किया जा सके।^[28]

ग्रीडी एल्गोरिथ्म: PMU प्लेसमेंट लागत को कम करने के लिए संदर्भ ने ग्रीडी एल्गोरिथ्म का उपयोग किया, जिसमें लगभग $(1-1/e)$ दक्षता मिली। ग्रीडी एल्गोरिथ्म को अन्य उपायों की तुलना में व्यावहारिक मामलों में अधिक आकर्षक बनाने वाला यह विशिष्ट प्रदर्शन है, जिसमें बहु-चरण कॉन्फिगरेशन और सीमित संसाधनों की आवश्यकता है। सिम्युलेशन परिणामों से पता चलता है कि इस विधि का प्रदर्शन संशोधित एल्गोरिथ्म की सबसे अच्छी दक्षता के करीब है।^[29]

सिस्टम पुनः संदर्भ वितरण नेटवर्क में ऊर्जा हानि को कम करने के लिए एंट कॉलोनी एल्गोरिथ्म एक अनुकूलन उपकरण है। बाद में, अधिकतम प्रणाली

अवलोकनीयता को ध्यान में रखते हुए न्यूनतम PMU की संख्या के साथ PMU प्लेसमेंट स्थान का निर्धारण करने के लिए ग्रीडी एल्गोरिथ्म का उपयोग किया गया है। न्यूनतम-प्रयास मॉडल कुछ विशिष्ट परिस्थितियों में हेर फेर करने के लिए सहमत होने वाले सेंसरों की कमी की गणना करता है। इस मॉडल में सबसे छोटे सेंसर सेट का अस्तित्व पता चला। रक्षा रणनीति के लिए, एक पीएमयू-आधारित ग्रीडी एल्गोरिथ्म का उपयोग किया गया। इस एल्गोरिथ्म ने प्रणाली की अवलोकनीयता को कम किया और डेटा अखंडता हमलों से भी बचाव किया।

पार्टिकल स्वार्म ऑप्टिमाइजेशन (PSO): यह तकनीक जनसंख्या-आधारित संयुक्त स्थानांतरण विधि है, जो पक्षियों के समूह के सामाजिक व्यवहार (एक साथ उड़ने) पर आधारित है। गोपा कुमार एवं अन्य^[27] द्वारा प्रस्तावित एक एल्गोरिथ्म है जो पार्टिकल स्वार्म ऑप्टिमाइजेशन (PSO) पर आधारित है और विशेष विद्युत पावर ग्रिड टोपोलॉजी में OPP समस्या को हल करेगा। IEEE 14, 30 और 68-बस प्रणालियों ने इस तकनीक को सफलतापूर्वक टेस्ट किया। ब्राजील के विद्युत ग्रिड के एक बड़े हिस्से में इस तकनीक की उपयोगिता का अध्ययन किया गया है। सुधारित PSO (IPSO) प्रणाली का परिचय IPSO की सीमाओं को पार करने के लिए GA और SA विशेषताएँ शामिल की गई हैं। यह एल्गोरिथ्म स्थानीय श्रेणीय बिंदु खोज सकता है, इससे समय और स्थानीय खर्च कम हो सकते हैं। OPP समस्या को व्यावहारिक बनाने के लिए कई समाधान हैं; इसलिए दो तरीकों का मिश्रण बेहतर समाधान दे सकता है। लघुगणक बाइनरी PSO (EBPSO) प्रणाली की सिफारिश की जाती है। EBPSO तकनीक का उद्देश्य विद्युत प्रणाली में अधिकतम अवलोकनीयता हासिल करना और अवलोकनीयता समस्या को हल करना है। शून्य इन्जेक्शन, एकल-PMU आउटेज और सामान्य संचालन नियम इस प्रस्तावित प्रक्रिया में शामिल हैं। साइगमॉइड फलन प्रत्येक घटक की दक्षिणांशीय तकनीकी को बदलता है।^[30]

डिफरेंशियल एवोल्यूशन: स्थानन समस्या को हल करने के लिए डिफरेंशियल एवोल्यूशन (DE) विधि की सिफारिश की गई है, जिसमें PMU उपकरणों और पावर प्लो मापनों, जो पावर ग्रिड में स्थिति चरों को निर्धारित

करते हैं, शामिल हैं। PMU मापन पुनरावृत्ति को समायोजित करने और मापन उपकरणों की संख्या को कम करने के लिए एक संयुक्त स्थानन समस्या बनाई गई, जिसका उद्देश्य पूरे नेटवर्क की अवलोकनीयता सुनिश्चित करना था। इस समस्या को, अधिकतम सिस्टम अवलोकनीयता पुनरावृत्ति सूचकांक का उपयोग करके और विशिष्ट समस्याओं के लिए संशोधित समाधान की उपस्थिति को समझ में लाकर हल किया गया। सिस्टम की पूर्णांक अरैखिक प्रोग्रामन (आईपी) समस्या को हल करने और विद्युत पावर ग्रिड में व्यावसायिक समस्याओं को हल करने के लिए डिफरेंशियल एल्गोरिथ्म का उपयोग किया गया। इस तकनीक को मैटलैब में कई मानक परीक्षण प्रणालियों (IEEE 7 और 14 बस परीक्षण प्रणालियों) पर सत्यापित किया गया, जिसमें इंजेक्शन बसों के साथ/ बिना इसकी विश्वसनीयता की जांच की गई।^[31]

प्रयुक्त कार्यप्रणाली

इस अध्ययन में पावर सिस्टम विश्लेषण के लिए PSAT (Power System Analysis Toolbox) का उपयोग किया गया है। PMU प्लेसमेंट दो प्रमुख तरीकों से किया गया है: पूर्णांक रैखिक प्रोग्रामन और डेप्थ फर्स्ट खोज। इस अध्ययन में MATLAB आधारित एक ILP प्रोग्राम का उपयोग किया गया है, जो विभिन्न IEEE बस प्रणालियों के लिए PMU (प्लेसमेंट के परिणाम) प्राप्त करता है। निम्नलिखित चरणों में कार्य प्रणाली विभाजित की गई है:

1. PSAT टूलबॉक्स का उपयोग- PSAT एक MATLAB टूल बॉक्स है, जिसका उपयोग पावर सिस्टम के मॉडलिंग, सिमुलेशन, और विश्लेषण के लिए किया जाता है। इस टूलबॉक्स का उपयोग करके विभिन्न IEEE बस प्रणालियों का मॉडल तैयार किया गया।

2. डेप्थ फर्स्ट सर्च विधि- डेप्थ फर्स्ट सर्च, एक ग्राफ सर्च एल्गोरिथ्म है जिसका उपयोग ग्राफ की सभी नोड्स और उनके संबंधों का विश्लेषण करने के लिए किया जाता है। इस प्रक्रिया का उपयोग करके प्रत्येक नोड पर PMU स्थापित करने की क्षमता की खोज की गई ताकि पावर सिस्टम की पूर्ण अवलोकन क्षमता सुनिश्चित की जा सके। ताकि सभी नोड्स देखे जा सकें, DFS ने PMU को किस नोड पर स्थापित करना आवश्यक है पता लगाने में मदद की।

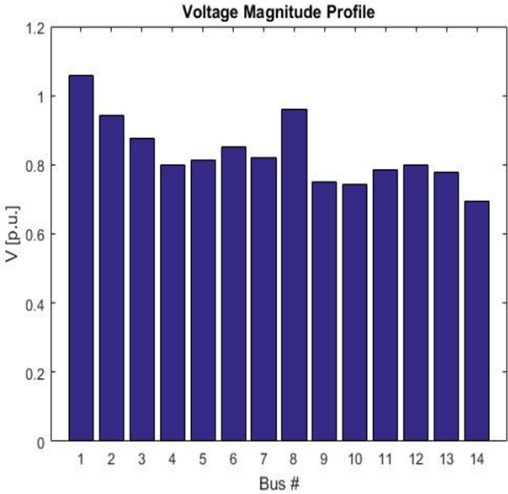
3. ILP मॉडल का उपयोग करके, विभिन्न IEEE बस प्रणालियों पर PMU की न्यूनतम आवश्यकता और उनके उपयुक्त स्थान निर्धारित किए गए। इस अनुकूलन समस्या को हल करने के लिए MATLAB का उपयोग किया गया, जिससे सटीक और प्रभावी परिणाम मिले। हमने दोनों तरीकों का उपयोग करके विभिन्न केस स्टडीज पर PMU प्लेसमेंट का विश्लेषण किया और पावर सिस्टम की विश्वसनीयता और स्थिरता में सुधार का मूल्यांकन किया। PSAT टूलबॉक्स ने इन प्रक्रियाओं को लागू करने और परीक्षण करने में महत्वपूर्ण योगदान दिया है, जिससे हमारे शोध में उच्च सटीकता और प्रभावशीलता मिली है।

केस स्टडीज और प्रायोगिक परिणाम

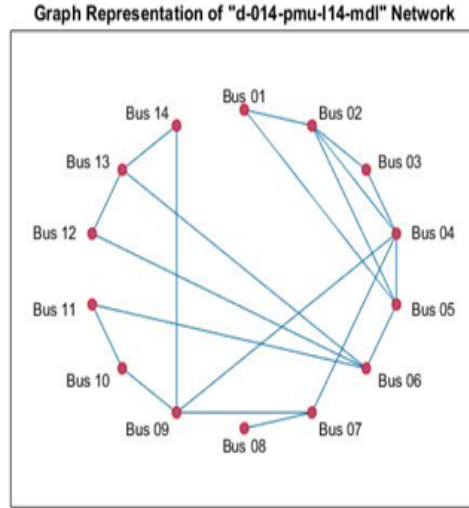
IEEE-14 बस प्रणाली का विश्लेषण और अनुसंधान किया जाता है। इस सिस्टम में चौबीस बसें, पांच जनरेटर और बीस लाइनें हैं। वोल्टेज और एंगल अनुमानित माप पावर सिस्टम की स्थिरता और स्थिति का विश्लेषण करने में महत्वपूर्ण हैं। तालिका 1 में IEEE-14 बस सिस्टम के वोल्टेज और एंगल मापों का विवरण है। इस लेख में आदर्श PMU स्थान का निर्धारण डेपथ फर्स्ट ऊर्जा-प्रवाह विश्लेषण टूलबॉक्स का उपयोग करके किया गया है। परिणाम तालिका में हैं। तालिका 1 में भी अनुमानित वोल्टेज और थ्रीटा PMU माप के रूप में दिखाए गए हैं। IEEE-14 बस सिस्टम का वोल्टेज प्रोफाइल चित्र 1 में दिखाया गया है।

तालिका 1. IEEE-14 बस के लिए वोल्टेज और एंगल अनुमानित माप

Estimated Voltage	Estimated Theta	PMU Bus Location
PM5 1.0365 1.0365 1.0405	0.23784 -0.38505 -0.38997	BUS 1,2,3
PMU1 1.0415 1.044	-0.32529 -0.36662	BUS 4,5
PMU2 1.0083 1.0715	-0.25857 -0.39609	BUS 6,7
PMU6 1.053 1.0166	-0.34844 -0.31917	BUS 8,9
PMU 4 1.0158 1.0082 1.0027	-0.31081 -0.31531 -0.29052	BUS 10,11,12
PMU3 1.0153	-0.28203	BUS 14



चित्र 1. वोल्टेज प्रोफाइल 14 बस प्रणाली



चित्र 2. वोल्टेज प्रोफाइल 14 बस प्रणाली

उपयोग

इन वोल्टेज और एंगल मापों का उपयोग निम्नलिखित के लिए किया जाता है-

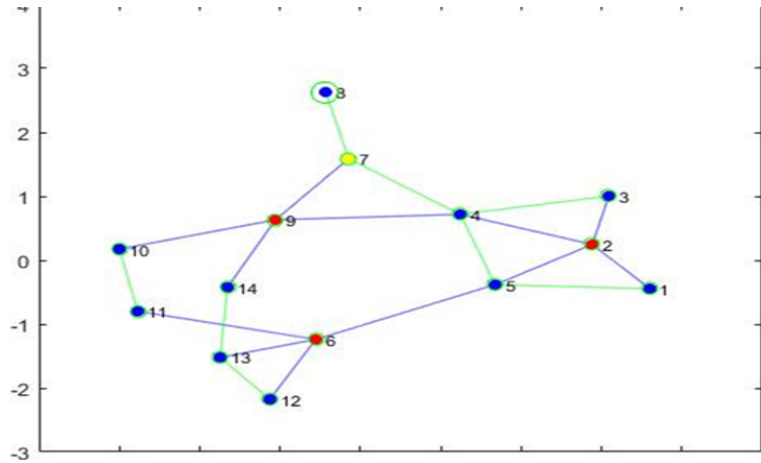
1. **पावर फ्लो एनालिसिस-सिस्टम** के विभिन्न हिस्सों में विद्युत प्रवाह का अध्ययन करना।
2. **वोल्टेज स्थिरता आकलन-** यह देखने के लिए कि सिस्टम स्थिरता की दृष्टि से सुरक्षित है या नहीं।
3. **फॉल्ट डिटेक्शन-** किसी भी विद्युत गड़बड़ी की स्थिति में समस्या की पहचान करना।
4. **रियल-टाइम मॉनिटरिंग-** विद्युत पावर सिस्टम की वर्तमान स्थिति पर नजर रखना।

इन मापों के जरिए पावर सिस्टम के प्रदर्शन और स्थिरता की निगरानी की जाती है, जिससे विद्युत आपूर्ति की विश्वसनीयता और दक्षता सुनिश्चित की जा सके।

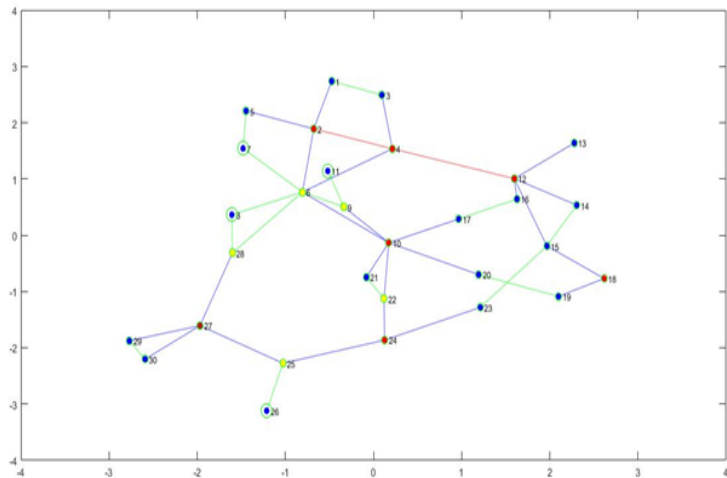
इस लेख में ILP का उपयोग करके PMU का सबसे अच्छा स्थान बताया गया है। नीचे दी गई तालिका 2 में IEEE-14 और 30, 57 बस प्रणाली के परिणाम दिखाए गए हैं। शून्य इंजेक्शन बसों का PMU स्थान निर्धारण पर प्रभाव देखा गया है। ILP उपयुक्त PMU स्थान निर्धारण चित्र 3, 4, 5, बस प्रणाली-14, 30, 57 में दिखाया गया है, जैसा कि तालिका 2 में दिखाया गया है।

तालिका 2. शून्य इंजेक्शन बसों को ध्यान में रखते हुए ILP के साथ पीएमयू स्थान निर्धारण

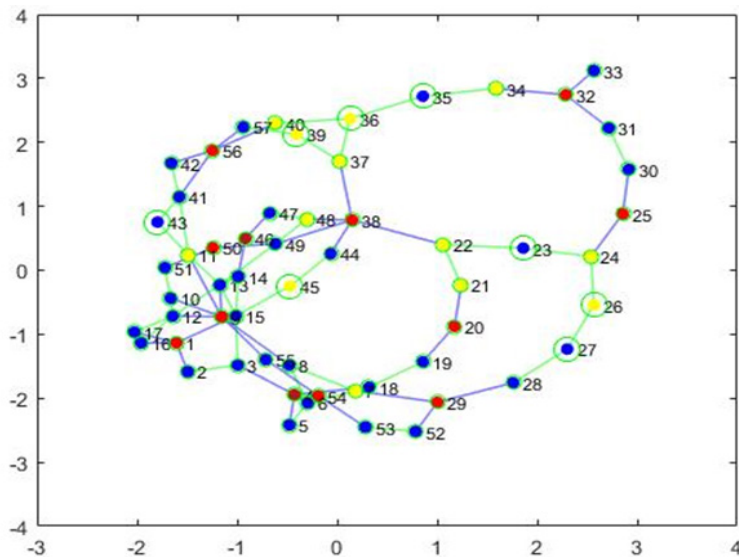
Bus System	No. of PMU	शून्य इंजेक्शन बसों को ध्यान में रखते हुए ILP के साथ PMU स्थान निर्धारण
IEEE-14 Bus System	3	2, 6, 9
IEEE &30 Bus System	7	2, 4, 10, 12, 18, 24, 27
IEEE &57 Bus System	12	1, 4, 9, 20, 25, 29, 32, 38, 46, 50, 54, 56



चित्र 3. 14 बस प्रणाली में ILP का उपयुक्त PMU स्थान निर्धारण



चित्र 4. 30 बस प्रणाली में ILP का उपयुक्त PMU स्थान निर्धारण



चित्र 5. 57 बस प्रणाली में ILP का उपयुक्त PMU स्थान निर्धारण

निष्कर्ष

उन्नत निगरानी तकनीकों जैसे PMU बिजली की बढ़ती मांग और नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों के एकीकरण के बीच पावर ग्रिड को प्रभावी ढंग से प्रबंधित करने के लिए आवश्यक हैं। पावर यूटिलिटी ग्रिड स्थिरता को बढ़ा सकते हैं, परिचालन खर्च को कम कर सकते हैं, और एक अधिक विश्वसनीय बिजली आपूर्ति सुनिश्चित कर सकते हैं, PMU द्वारा प्रदान किए गए सटीक, रियल-टाइम डेटा का लाभ उठाकर और उनकी तैनाती को अनुकूलित कर सकते हैं। जैसे-जैसे विश्लेषणात्मक तरीके और तकनीक विकसित होते जाते हैं, PMU को रणनीतिक रूप से तैनात करना और इसका उपयोग नवीनतम पावर सिस्टम प्रबंधन में महत्वपूर्ण रहेगा। इस अध्ययन में, PSAT टूल बॉक्स और MATLAB आधारित पूर्णांक रैखिक प्रोग्रामन (ILP) दोनों का उपयोग किया गया था ताकि विभिन्न IEEE बस प्रणालियों में PMU प्लेसमेंट की समस्या को हल किया जा सके। हमने डेप्थ फर्स्ट सर्च और ILP तकनीकों का उपयोग करके इष्टतम PMU प्लेसमेंट निर्धारित किया, जो न्यूनतम लागत पर विद्युत प्रणाली की पूरी अवलोकन क्षमता सुनिश्चित करता है। परिणामों ने दिखाया कि ILP विधि विभिन्न पावर सिस्टम कॉन्फिगरेशनों के लिए प्रभावी और सटीक समाधान है। इसके अलावा, इन प्रक्रियाओं का प्रयोग विद्युत प्रणाली की विश्वसनीयता और स्थिरता में सुधार करने में भी महत्वपूर्ण साबित हुआ। भविष्य में पावरग्रिड के संचालन को और अधिक सक्षम और विश्वसनीय बनाने के लिए, इन प्रक्रियाओं के नवीनतम संस्करणों को विकसित और गहन परीक्षण किया जा सकता है।

शोध पत्र में प्रयुक्त अंग्रेजी शब्दों की समानार्थक हिन्दी शब्दावली

Alphabetically sorted terminology in English	वर्णानुक्रमित हिन्दी शब्दावली
Artificial Intelligence	कृत्रिम बुद्धिमत्ता
Integer Linear Programming	पूर्णांक रैखिक प्रोग्रामिंग
Objective Function	उद्देश्य फलन
Phasor Measurement Unit (PMU)	फेजर मापन इकाई
Power System Analysis Toolbox	ऊर्जा-प्रवाह विश्लेषण टूल बॉक्स
Power System Observability	पावर सिस्टम अवलोकन
Wide Area Monitoring System	व्यापक क्षेत्र निगरानी प्रणाली
Zero Injection Bus	शून्य इंजेक्शन बस

संदर्भ

1. M. A. Rahman, A. H. M. Jakaria, and E. Al-Shaer, Formal Analysis for Dependable Supervisory Control and Data Acquisition in Smart Grids, in 2016 46th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN), (2016), pp. 263–274. doi: 10.1109/DSN. (2016)-32.
2. J. Liao and C. He, “Wide-area monitoring protection and control of future power system networks,, in 2014 IEEE Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications (WARTIA), (2014), pp. 903–905. doi” 10.1109/WARTIA.2014-6976419.
3. M. Khodadadi Arpanahi, R. Torkzadeh, A. Safavizadeh, A. Ashrafzadeh, and F. Eghtedarnia, “A novel comprehensive optimal PMU placement considering practical issues in design and implementation of a wide-area measurement system, Electr. Power Syst. Res., vol. 214, p. 108940, (2023), doi” <https://doi.org/10.1016/j.eprs.2022-108940>.
4. A. Pal, A. K. S. Vullikanti, and S. S. Ravi, A PMU Placement Scheme Considering Realistic Costs and Modern Trends in Relaying,, IEEE Trans. Power Syst., vol. 32, no. 1, pp. 552–561, (2017), doi: 10.1109/TPWRS.2016-2551320.
5. J. Paudel, X. Xu, and E. B. Makram, PMU deployment approach for maximum observability considering its potential loss,, in 2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), (2016), pp. 1–5. doi: 10.1109/TDC-2016-7519891.
6. L. Xie, Q. hZao, and V. Venkatasubramanian, A PMU-based early warning system for power system oscillations, IEEE Trans- Smart Grid, vol. 8, no. 4, pp. (1960–1969), (2017).
7. A. Mahari and R. Nuqui, PMU-based solutions for dynamic state estimation and voltage stability monitoring, Electr. Power Syst. Res., vol. 134, pp. 12–23, (2016).
8. J.H Zang and M. Kezunovic, Improving SCADA system performance using PMU data, Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol- 107, pp. 340–349, (2019).
9. K. Kouzelis and V. Terzija, PMU-based wide area monitoring and control systems for power system protection and emergency control,, IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 3, pp. 3218–3229, (2018).
10. F. Khan and H. hZu, Optimal PMU placement considering system observability and redundancy,, Electr. Power Syst. Res., vol- 187, p. 106502, (2020).

11. A. Maji, S. Chakrabarti, and S. C. Srivastava, An exponential binary particle swarm optimization algorithm for multiple solutions of optimal PMU placement in smart grids, *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 13, no. 6, pp. 3246–3255, (2017).
12. M. Kumari, L. Srivastava, and S. P. Singh, Optimal PMU placement considering redundancy using binary particle swarm optimization, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol- 90, pp- 84–92, (2017).
13. M. N. Rahman and A. F. Zobaa, A novel hybrid mutation strategy based binary particle swarm optimization for optimal PMU placement, *IEEE Access*, vol. 8, pp- 16284–16294, (2020).
14. Q. Li, X. hZao, and Q. Wang, Optimal PMU placement model based on integer linear programming, *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 513–522, (2018).
15. A. Laouid, M. Boudour, and M. Rahli, A hybrid PSO-GSA algorithm for optimal placement of PMUs, *Electr. Eng.*, vol. 101, no. 2, pp. 567–576, (2019).
16. R. Meenakshi Devi and M. Geethanjali, Combined genetic algorithm and minimum spanning tree for optimal PMU placement, *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 23, no. 3, pp. 570–580, (2020).
17. M. H. Kasma and A. F. Taha, Revisiting the optimal PMU placement problem in multi-machine power networks, *IEEE Trans- Power Syst.*, (2023).
18. H. Khorramdel, B. Mohammadi-Ivatloo, and M. Marzband, Practical considerations in optimal PMU placement, *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, (2023).
19. M. H. Kasma and A. F. Taha, Revisiting the optimal PMU placement problem in multi-machine power networks, *arXivPrepr- arXiv2306-12345*, (2023).
20. K. Negash, B. Khan, and E. Yohannes, Artificial Intelligence Versus Conventional Mathematical Techniques: A Review for Optimal Placement of Phasor Measurement Units, *Technol. Econ. Smart Grids Sustain- Energy*, vol. 1, no. 1, p. 10, (2016), doi: 10-1007/s40866-016-0009-y.
21. D. P. Kothari and N. Jain, Integer Linear Programming for Optimal Phasor Measurement Unit Placement in Power Systems, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 131, no. 1, p. 107678, (2021), doi: 10-1016@j-ijepes-2021-107678.
22. C.M. Akachukwu, A.M. Aibinu, M.N. Nwohu, and H. B. Salau, A Decade Survey of Engineering Applications of Genetic Algorithm in Power System Optimization, in *2014 5th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*, (2014), pp. 38–42. doi: 10-1109/ISMS-(2014-15).
23. Z. J. Liu, M. Y. Wang, and D. D. Wang, Application of scaling genetic algorithms using mapreduce in optimizing the configuration of PMU, in *2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, (2016), pp. 1–5. doi:10-1109/CICED.2016-7576167.
24. N. Koutsoukis, N. Manousakis, P. Georgilakis, and G. Korres, Numerical observability method for optimal phasor measurement units placement using recursive Tabu search method, *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol.7, no. 4, pp. 347–356, (2013), doi: 10-1049/iet-gtd-2012-0377.
25. K.M. Hassanin, A. A. Abdelsalam, and A. Y. Abdelaziz, Optimal PMUs placement for full observability of electrical power systems using flower pollination algorithm, in *2017 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, (2017), pp. 20–25. doi: 10-1109/SEGE-2017-8052770.
26. E. Aarts, J. Korst, and W. Michiels, *Simulated Annealing BT & Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques*, E.K. Burke and G. Kendall, Eds. Boston, MA/ Springer US, (2005), pp. 187–210. doi/ 10-1007/0-387-28356-0_7.
27. P. Gopakumar, M.J.B. Reddy, and D.K. Mohanta, Novel multi-stage simulated annealing for optimal placement of PMUs in conjunction with conventional measurements, in *2013 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, (2013), pp. 248–252. doi: 10-1109/EEEIC-2013-6549625.
28. S. and others Mandava, A Spanning Tree Approach in Placing Multi-Channel and Minimum channel PMU for Power system Observability, *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 5, no. 3, (2015).
29. V. Tran and H. hZang, Optimal PMU Placement Using Modified Greedy Algorithm, *J. Control. Autom. Electr. Syst.*, vol. 29, no. 1, pp. 99–109, (2018), doi: 10-1007/s40313-017-0347-6.
30. T. K. Maji and P. Acharjee, Multiple solutions of optimal PMU placement using exponential binary PSO algorithm, in *(2015) Annual IEEE India Conference (INDICON)*, (2015), pp. 1–6. doi: 10-1109/INDICON-2015-7443403.
31. B. Rajasekhar and A. K. Chandel, Joint placement of phasor and power flow measurements for power system observability using differential evolution, in *(2013) International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*, (2013), pp. 489–494. doi: 10-1109/ICPEC-2013-6527706.

□