

QUYOSH ENERGIYASIDAN FOYDALANISH SAMARADORLIGINI OSHIRISH UCHUN YANGI INVERTOR TEXNOLOGIYALAR

Tolipova Surayyo Baxodirovna

Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti o'qituvchisi

Abduraimov Suxrob Azizjon o'g'li

*Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti Energetika
muhandisligi fakulteti talabasi*

Dexqonov Behruz Voxid o'g'li

*Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti Energetika
muhandisligi fakulteti talabasi*

Annotatsiya: Ushbu maqolada fotovoltaik (FV) quvvat tizimlarining umumiy samaradorligini oshirishga qaratilgan zamonaviy inverter texnologiyalarining rivojlanishi va imkoniyatlari tahsil qilinadi. An'anaviy inverter tizimlarida kuzatiladigan energiya yo'qotishlari va ularning tizim ishlashiga ta'siri tahlil qilinadi. Markaziy, string va mikroinverterlar kabi turlarning solishtirma tahlili asosida har bir texnologiyaning afzalliklari va kamchiliklari ochib beriladi. Maqolada, ayniqsa, ko'p kirishli DC-DC konvertorlari, keng tarmoqli yarimo'tkazgichlar (SiC va GaN) asosidagi inverterlar va aqlli maksimal quvvat nuqtasi kuzatish (MPPT) algoritmlari kabi so'nggi yutuqlarga alohida e'tibor qaratiladi. Ushbu yangi texnologiyalar elektr energiyasini ishlab chiqarishning o'rtacha yillik samaradorligini sezilarli darajada oshirishi, tarmoqqa integratsiyani yaxshilashi va fotovoltaik tizimlarning iqtisodiy jozibadorligini oshirishi ko'rsatib beriladi. Tadqiqot natijalari, ushbu texnologiyalarni joriy etish energiya konversiyasining samaradorligini 3-8% ga oshirishi mumkinligini ko'rsatadi, bu esa FV stansiyasining butun hayot davomidagi daromadini sezilarli darajada oshiradi.

Kalit so'zlar: Fotovoltaik inverter, energiya samaradorligi, maksimal quvvat nuqtasi kuzatish (MPPT), keng tarmoqli yarimo'tkazgichlar, fotovoltaik tizimlar, mikroinverter, quyosh energetikasi.

Kirish

Quyosh energiyasining jahon energiya balansidagi ulushi barqaror o'sib bormoqda. Bu o'sish fotovoltaik texnologiyalarning tez rivojlanishi, qurilish narxlarining pasayishi va energiya xavfsizligi hamda ekologik barqarorlikka bo'lgan ehtiyoj bilan bog'liq. Biroq, fotovoltaik tizimlarning keng miqyosda joriy etilishiga qaramay, ularning samaradorligi bo'yicha muammolar hali ham mavjud. Quyosh panellari tomonidan yutilgan quyosh nurlari energiyasining elektr energiyasiga aylantirilishi bir qator bosqichlarni o'z ichiga oladi, ulardan har biri ma'lum darajada

energiya yo'qotishlariga olib keladi. Shunday qilib, butun fotovoltaik tizimning samaradorligi panellarning o'ziga xos samaradorligi bilan bir qatorda boshqa tarkibiy qismlar, xususan inverterning ishlash sifatiga ham bog'liq.

Inverter fotovoltaik tizimning eng muhim qurilmalaridan biri bo'lib, uning vazifasi quyosh panellari tomonidan ishlab chiqarilgan to'g'ridan-to'g'ri tokni iste'molchilar tomonidan ishlatiladigan almashinuvchi tokka aylantirishdan iborat. An'anaviy inverter texnologiyalari ko'pincha turli sabablarga ko'ra energiya konversiyasining yuqori samaradorligini ta'minlay olmaydi. Ularning kamchiliklari orasida past yuklanish rejimlarida samaradorlikning keskin pasayishi, murakkab soyalanish sharoitlarida samarali ishlamasligi, cheklangan nazorat va monitoring imkoniyatlari, shuningdek, yirik o'lchamlari va yuqori narxi kabilar kiradi. Bundan tashqari, an'anaviy inverterlar ko'pincha fotovoltaik tizimning kam quvvat ishlab chiqaradigan vaqtlarida, masalan, erta tongda va kechqurun, shuningdek, bulutli havoda samarasiz ishlaydi.

So'nggi yillarda inverter texnologiyalari sohasida sezilarli yutuqlarga erishildi, ular fotovoltaik tizimlarning umumiy samaradorligini oshirishga qaratilgan. Yangi avlod inverterlari nafaqat energiyani samarali aylantirish, balki tizimni boshqarish, monitoring qilish va hatto tarmoqni qo'llab-quvvatlash imkoniyatlariga ham ega. Ushbu innovatsion yechimlar orasida mikroinverterlar, keng tarmoqli yarimo'tkazgichlar asosidagi inverterlar, aqlli maksimal quvvat nuqtasi kuzatish algoritmlari va modulli inverter arxitekturasini alohida ajralib turadi.

Mikroinverterlar har bir quyosh paneliga alohida o'rnatiladi va har bir panel mustaqil ravishda maksimal samaradorlikda ishlashini ta'minlaydi. Bu yondashuv, ayniqsa, soyalanish yoki turli xil panellar bilan bog'liq muammolarni samarali hal qiladi. Keng tarmoqli yarimo'tkazgich materiallar, xususan kremniy karbid va gallyum nitrid asosidagi tranzistorlar esa yuqori chastotali va yuqori samaradorlikka ega bo'lgan ixcham inverterlarni yaratish imkonini berdi. Bu materiallar issiqlik yo'qotishlarini sezilarli darajada kamaytirib, inverterning ishlash muddatini uzaytiradi.

Aqlli boshqaruv algoritmlari, xususan yangi avlod maksimal quvvat nuqtasi kuzatish usullari, fotovoltaik panellarning turli ob-havo sharoitlarida ham optimal ishlashini ta'minlaydi. Ushbu algoritmlar bulutli havoda, harorat o'zgarishida va boshqa noqulay sharoitlarda ham yuqori samaradorlikni saqlab qolish imkonini beradi. Bundan tashqari, zamonaviy inverterlar ma'lumotlarni uzatish va masofaviy nazorat qilish imkoniyatlariga ega bo'lib, bu esa fotovoltaik tizimlarni boshqarishni soddalashtiradi va ularning ishonchliligini oshiradi.

Tadqiqot natijalari fotovoltaik energetika sohasida faoliyat yurituvchi mutaxassislar, loyiha ishlab chiquvchilar va investorlar uchun amaliy ahamiyatga ega bo'lib, ularga eng samarali inverter texnologiyalarini tanlashda yordam beradi. Bundan tashqari, tadqiqot yangi inverter texnologiyalarining rivojlanish tendensiyalarini ilmiy

asoslashga xizmat qiladi va kelajakdagi izlanishlar yo'nalishlarini belgilashga yordam beradi.

Asosiy qism

Fotovoltaik tizimlarning samaradorligini oshirish bo'yicha olib borilgan tadqiqotlar ko'rsatishicha, an'anaviy markaziy inverter texnologiyalarining kamchiliklari tufayli quyosh energiyasidan to'liq foydalanish imkoni cheklangan. Markaziy inverterlar odatda butun FV qurilmasining markaziy nuqtasida o'rnatilib, barcha panellardan keladigan quvvatni qayta ishlaydi. Bu yondashuvning asosiy muammosi shundaki, har bir panelning ishlash parametrlari (harorat, yorug'lik darajasi, ifloslanish, yosh, nuqsonlar) farq qilishi mumkin. Panellarning birortasi soya ostida qolsa, ifloslansa yoki uning ba'zi qismlari zararlangan, butun tizimning ishlashi eng zaif panel darajasiga tushib qoladi. Bu hodisa "qadoq simidagi eng zaif halqa" tamoyiliga o'xshab, butun qatorning samaradorligini sezilarli darajada pasaytiradi. An'anaviy tizimlarda, ayniqsa qisman soyalanish sharoitida, energiya yo'qotishlari 20-30% gacha yetishi mumkin. Tahlillar shuni ko'rsatadiki, markaziy inverterlar faqat ma'lum bir kuchlanish va tok oralig'ida optimal samaradorlikka erishadi, ularning samaradorlik egri chizig'i tor diapazonda yuqori qiymatni saqlab, yuklanishning past va yuqori chegaralarida keskin pasayadi. Bu esa erta tong va kechqurun soatlarida, shuningdek bulutli kunlarda tizim samaradorligining tushib ketishiga olib keladi.

So'nggi yillarda inverter texnologiyalaridagi eng muhim yutuqlardan biri mikroinverter tizimlarining keng tarqalishi bo'ldi. Mikroinverterlar har bir quyosh paneliga alohida o'rnatiladi va har bir panelni mustaqil ravishda boshqarish imkonini beradi. Bu texnologiyaning asosiy afzalligi shundaki, u panel darajasidagi maksimal quvvat nuqtasi kuzatishni amalga oshiradi. Ya'ni, har bir panel o'zining optimal ishlash nuqtasida ishlaydi, boshqa panellarning holatiga bog'liq bo'lmaydi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatdiki, mikroinverter tizimlaridan foydalanish, ayniqsa murakkab tom konfiguratsiyalarida, nuqsonli panellar mavjud bo'lgan hollarda va qisman soyalanish sharoitida energiya ishlab chiqarishni an'anaviy markaziy inverter tizimlariga nisbatan 5% dan 25% gacha oshirishi mumkin. Biroq, mikroinverter texnologiyasining o'ziga xos kamchiliklari ham mavjud. Har bir panel uchun alohida inverter qurilmasi talab qilinishi narxning oshishiga olib keladi, bu esa umumiy loyiha kapital xarajatlarini yanada oshiradi. Bundan tashqari, mikroinverterlar tomga o'rnatilganligi sababli ularga texnik xizmat ko'rsatish va ta'mirlash qiyinroq, bu esa uzoq muddatli ishonchlilik va xizmat qilish muddati masalasini dolzarb qiladi. Hisob-kitoblar shuni ko'rsatadiki, mikroinverter tizimlarining yuqori boshlang'ich narxi, asosan, qo'shimcha energiya ishlab chiqarish hisobiga 5-8 yil ichida oqlanadi, ammo bu parametr mintaqaviy quyosh resursi, elektr tariflari va subsidiyalar tizimiga bog'liq holda o'zgarishi mumkin.

String inverter texnologiyasi an'anaviy markaziy va zamonaviy mikroinverter

yondashuvlari o'rtasidagi kompromis yechim sifatida paydo bo'ldi. String inverterlar bir nechta panellardan iborat bir qatorga ulanadi va har bir qatorni alohida boshqaradi. Bu yondashuv bir tomonda markaziy inverterlarga qaraganda yaxshiroq moslashuvchanlik va boshqaruv imkonini beradi, boshqa tomondan mikroinverterlarga nisbatan narx jihatidan afzalroq bo'ladi. Zamonaviy string inverterlar ko'p kirishli MPPT funksiyasiga ega bo'lib, turli yo'nalishlarda yoki turli sharoitlarda joylashgan panellar qatorlarini alohida optimallashtirish imkonini beradi. Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, ikkita mustaqil MPPT kirishiga ega string inverterdan foydalanish, panellar bir xil sharoitda bo'lmaganda energiya ishlab chiqarishni 3-15% ga oshirishi mumkin. Biroq, string inverter tizimlarida ham bir qator ichidagi panellarning o'zaro bog'liqligi muammosi saqlanib qoladi. Agar qatorning biror panelida muammo yuzaga kelsa, butun qatorning ishlashiga salbiy ta'sir ko'rsatadi. Shuningdek, string inverterlar odatda binoning ichki qismiga yoki yashirin joyga o'rnatiladi, bu esa ularni sovutish va issiqlik boshqaruvi masalasini keltirib chiqaradi, chinkan yuqori harorat inverter elektronikasining yemirilish tezligini oshiradi va uning samaradorligini pasaytiradi.

Inverter texnologiyalaridagi muhim yutuqlardan biri keng tarmoqli yarimo'tkazgich materiallar – kremniy karbid va gallyum nitridning qo'llanilishidir. An'anaviy kremniy asosidagi IGBT tranzistorlari o'zlarining ishlash chastotasi, kommutatsiya yo'qotishlari va issiqlik boshqaruvi jihatidan cheklovlarga ega. SiC va GaN tranzistorlari esa sezilarli darajada yuqori kommutatsiya chastotalarida samarali ishlash qobiliyatiga ega. Bu yuqori chastota inverterning o'lchamlarini va og'irligini kamaytirish, filtrlarning soddalashuvi va xarajatlarning pasayishi, shuningdek umumiy samaradorlikning oshishiga olib keladi. SiC tranzistorlari an'anaviy Si asosidagi tranzistorlarga nisbatan 50-80% kommutatsiya yo'qotishlarini kamaytiradi va ishlash chastotasini 5-10 baravar oshiradi. GaN texnologiyasi esa yanada yuqori chastotalarda ishlash imkoniyatini beradi. Natijada, keng tarmoqli yarimo'tkazgichlar asosidagi inverterlarning samaradorligi 98% dan 99% gacha va undan yuqori bo'lishi mumkin. Bu farq birinchi qarashda ahamiyatsiz ko'rinsa-da, butun FV tizimning o'mri davomida yig'ilgan energiya ishlab chiqarish miqdori hisobga olinsa, sezilarli iqtisodiy samaraga olib keladi. Misol uchun, 100 kVt quvvatga ega FV qurilmasi uchun inverter samaradorligining 1% ga oshishi yiliga qo'shimcha 1000-1500 kVt soat energiya ishlab chiqarishni ta'minlaydi, bu esa o'n yillik davrda jami 10-15 ming kVt soatga teng bo'ladi. Keng tarmoqli yarimo'tkazgichlar, shuningdek, inverterlarning ishlash harorati diapazonini kengaytirib, issiq iqlimli mintaqalarda ishonchli ishlash imkonini beradi.

Maksimal quvvat nuqtasi kuzatish algoritmlarining rivojlanishi FV tizimlar samaradorligini oshirishning yana bir muhim yo'nalishi hisoblanadi. An'anaviy MPPT usullari (masalan, perturbatsiya va kuzatish usuli) oddiy va ishonchli bo'lsa-da, ular dinamik ob-havo sharoitida sekin javob beradi va barqaror holatda quvvat

tebranishlariga olib keladi. So‘nggi yillarda an’anaviy usullarni takomillashtirgan bir qator innovatsion algoritmlar ishlab chiqildi. Bulardan biri adaptiv tezlikli perturbatsiya va kuzatish usuli bo‘lib, u tizimning ishlash sharoitlariga qarab perturbatsiya qadamini dinamik ravishda o‘zgartiradi. Bu yondashuv barqaror sharoitda aniqlikni oshirish va o‘zgaruvchan sharoitda tezroq javob berish imkonini beradi. Yana bir muhim rivojlanish – neyron tarmoqlar va sun’iy intellektni qo‘llashga asoslangan MPPT algoritmlaridir. Ushbu algoritmlar tarixiy ob-havo ma’lumotlari, real vaqtda o‘lchangan parametrlar va panelning matematik modeliga asoslanib, maksimal quvvat nuqtasini bashorat qilish va topish qobiliyatiga ega. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, AI asosidagi MPPT algoritmlari an’anaviy usullarga nisbatan, ayniqsa bulutli, tez o‘zgaruvchan yorug‘lik sharoitida, energiya ishlab chiqarishni 2-8% ga oshirishi mumkin. Biroq, bunday murakkab algoritmlarning amaliy joriy etilishi qo‘shimcha hisoblash quvvatini talab qiladi, bu esa inverterni narxi va energiya iste’molini oshiradi.

FV inverter texnologiyalaridagi yana bir muhim tendensiya – tarmoqqa integratsiya qilish va tarmoqni qo‘llab-quvvatlash funksiyalarining rivojlanishidir. Zamonaviy aqlli inverterlar faqat energiya konvertatsiya qilish vositasi emas, balki energetika tizimining faol elementi hisoblanadi. Ular chastota va kuchlanishni muvozanatlash, reaktiv quvvatni boshqarish, tarmoqqa izolyatsiya qilish va hatto ad-hoc energetika tarmoqlarini shakllantirish qobiliyatiga ega. Bu funksiyalar, ayniqsa, elektr tarmog‘ining nodavlat energiya manbalari ulushi yuqori bo‘lgan hududlarda muhim ahamiyat kasb etadi. Inverterlar tarmoq stabililigini ta’minlash va energiya sifati muammolarini bartaraf etishda muhim rol o‘ynashi mumkin. Masalan, ular tarmoqdagi kuchlanish o‘sishi paytida quvvat ishlab chiqarishni avtomatik ravishda kamaytirishi yoki tarmoqda muammo yuzaga kelganda o‘z-o‘zidan tarmoqdan uzilishi kerak. Bu funksiyalar FV qurilmalarining tarmoqqa integratsiyasini yaxshilaydi va ularning xavfsizligini oshiradi.

FV inverter texnologiyalarini qiyosiy tahlil qilish shuni ko‘rsatadiki, har qanday loyiha uchun optimal yechimni tanlash bir qator omillarga bog‘liq: loyihaning o‘lchami, joylashuvi, iqlim sharoiti, tomning arxitektura xususiyatlari, moliyaviy imkoniyatlar va energiya bozoridagi talablar. Kichik va o‘rta o‘lchamli uy-joy loyihalari uchun mikroinverterlar eng yuqori energiya ishlab chiqarishni ta’minlashi mumkin, ammo yuqori boshlang‘ich kapital xarajatlari talab qilinadi. Yirik sanoat yoki utilita miqyosidagi loyihalar uchun yuqori samaradorlikka ega markaziy yoki string inverterlar, xususan keng tarmoqli yarimo‘tkazgichlar asosidagi qurilmalar, iqtisodiy jihatdan samaraliroq bo‘lishi mumkin. Muhim jihat shundaki, texnologiyaning tez rivojlanishi inverterlar narxining pasayishiga olib kelmoqda. So‘nggi o‘n yil ichida mikroinverterlarning kVt soati birligi narxi sezilarli darajada pasaydi, bu ularning raqobatbardoshligini oshirdi. Bundan tashqari, uzatish va monitoring tizimlarini o‘z

ichiga olgan yaxlit echimlar taklif qiluvchi inverter ishlab chiqaruvchilarining paydo bo'lishi FV tizimlarni boshqarishni soddalashtirdi va ularning ishonchliligini oshirdi.

Kelajakda FV inverter texnologiyalarining rivojlanishi bir necha yo'nalishda davom etishi kutilmoqda. Birinchidan, materialshunoslik sohasidagi izlanishlar yangi, yanada samarali yarimo'tkazgich materiallarni topishga qaratiladi. Ikkinchidan, sun'iy intellekt va mashina o'rganish algoritmlari MPPT va tizimni boshqarishni yanada takomillashtirishda muhim rol o'ynaydi. Uchinchidan, batareya quvvatini saqlash tizimlari bilan chuqur integratsiya qilinadigan inverterlar rivojlanmoqda, bu esa energetik mustaqillik va tarmoq barqarorligini yanada oshiradi. To'rtinchidan, blokcheyn texnologiyalari asosida energiya savdosini amalga oshirish imkonini beruvchi aqlli inverter tizimlari paydo bo'lishi mumkin. Bu tendensiyalar shuni ko'rsatadiki, inverter nafaqat FV tizimning passiv komponenti, balki butun energetika infratuzilmasining intellektual va faol elementi sifatida rivojlanmoqda.

Xulosa

Quyosh energiyasidan foydalanish samaradorligini oshirish muammosi zamonaviy energetikaning eng dolzarb masalalaridan biridir. Ushbu tadqiqotning natijalari shuni ko'rsatadiki, fotovoltaiik tizimlarning umumiy samaradorligini sezilarli darajada oshirishda inverter texnologiyalarining roli g'oyat muhimdir. An'anaviy markaziy inverter tizimlarining kamchiliklari – cheklangan moslashuvchanlik, qisman soyalanish sharoitida samaradorlikning keskin pasayishi, tor optimal ishlash diapazoni – ularni ko'p hollarda noqulay qilmoqda.

Yangi avlod inverter texnologiyalarining rivojlanishi ushbu muammolarni samarali hal qilish imkonini berdi. Mikroinverter tizimlari har bir quyosh panelini mustaqil boshqarish orqali, ayniqsa murakkab tom konfiguratsiyalari va o'zgaruvchan soyalanish sharoitida, energiya ishlab chiqarishni an'anaviy tizimlarga nisbatan 5-25% ga oshirishi mumkin. String inverterlar esa ko'p kirishli MPPT funksiyasi bilan turli yo'nalishdagi panellar qatorlarini alohida optimallashtirish imkonini berib, markaziy va mikro yondashuvlar o'rtasidagi muvozanatli yechimni taqdim etadi.

Materialshunoslik sohasidagi yutuqlar – kremniy karbid (SiC) va gallyum nitrid (GaN) kabi keng tarmoqli yarimo'tkazgichlarning qo'llanilishi – inverter texnologiyasida haqiqiy inqilobni amalga oshirdi. Ushbu materiallar kommutatsiya yo'qotishlarini sezilarli darajada kamaytirib, ishlash chastotasini oshirdi va inverter samaradorligini 99% dan yuqori darajaga ko'tardi. Bu o'z navbatida inverterlarning o'lchami va og'irligini kamaytirdi, issiqlik boshqaruvini yaxshiladi va xizmat muddatini uzaytirdi.

MPPT algoritmlarining evolyutsiyasi – an'anaviy usullardan adaptiv va sun'iy intellekt asosidagi tizimlarga o'tish – dinamik ob-havo sharoitida energiya ishlab chiqarishni stabilizatsiya qilish va maksimallashtirish imkonini berdi. Zamonaviy aqlli algoritmlar bulutli va o'zgaruvchan yorug'lik sharoitida ham yuqori samaradorlikni

saqlab qolishga qodir.

Kelajak istiqbollarini hisobga olganda, inverter texnologiyalarining rivojlanishi quyidagi yo‘nalishlarda davom etadi:

1. Yarimo‘tkazgich materiallar sohasida yangi innovatsiyalar
2. Sun’iy intellekt va mashina o‘rganishning chuqurroq integratsiyasi
3. Batareya saqlash tizimlari bilan uzviy birlashish
4. Aqlli tarmoqlar va energiya boshqaruvi tizimlari bilan o‘zaro

ta’sirlashuvning kuchayishi

Xulosa qilib aytish mumkinki, fotovoltaiik inverter texnologiyalaridagi zamonaviy yutuqlar nafaqat yakka tizimlar samaradorligini oshirish, balki butun quyosh energetikasi sanoatining rivojlanishiga sezilarli hissa qo‘shmoqda. Ushbu texnologiyalarni joriy etish quyosh energiyasining iqtisodiy jozibadorligini oshiradi, energiya xavfsizligini mustahkamlaydi va barqaror rivojlanish maqsadlariga erishishda muhim vosita bo‘lib xizmat qiladi. Tadqiqotlar va amaliy tajribalar shuni ko‘rsatadiki, inverter texnologiyalaridagi har qanday yaxshilanish fotovoltaiik tizimlarning energiya hasilosiga bevosita ijobiy ta’sir ko‘rsatadi, bu esa qayta tiklanuvchi energiya manbalarining global energiya balansidagi ulushini oshirish imkoniyatlarini kengaytiradi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Hua, C., & Fang, Y. (2021). *Advanced Inverter Technologies for Photovoltaic Systems: A Comprehensive Review*. IEEE Transactions on Power Electronics, 36(8), 8905-8923.
2. Blaabjerg, F., Yang, Y., & Liu, H. (2020). *Power Electronics for Renewable Energy Systems: Photovoltaic and Wind Power*. Elsevier Academic Press.
3. Kjaer, S. B., Pedersen, J. K., & Blaabjerg, F. (2022). *A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules*. IEEE Transactions on Industry Applications, 58(1), 365-378.
4. Islam, M., Mekhilef, S., & Hasan, M. (2019). *SiC and GaN Power Semiconductor Devices: A New Era for Power Electronics*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 112, 824-834.
5. Patel, H., & Agarwal, V. (2020). *Maximum Power Point Tracking Scheme for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 67(6), 4686-4696.
6. Kumar, N., Singh, B., & Panigrahi, B. K. (2021). *Grid-Integrated PV Systems with ML-Based MPPT and Power Quality Enhancement*. Solar Energy, 224, 1329-1342.

7. Guenneguez, S., & Karatepe, E. (2022). *Comparative Analysis of Central, String and Microinverters in Utility-Scale PV Plants*. *Energy Conversion and Management*, 253, 115167.
8. Ozdemir, S., & Altin, N. (2020). *Design and Implementation of a High-Efficiency SiC-Based PV Inverter with Intelligent Cooling System*. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 117, 105689.
9. REN21. (2023). *Renewables 2023 Global Status Report*. REN21 Secretariat, Paris.
10. International Energy Agency (IEA). (2022). *Photovoltaic Power Systems Programme Annual Report 2022*. IEA PVPS.