

FOTOVOLTAIKUS RENDSZEREK: SZABÁLYOZÁSI STRATÉGIÁK HÁLÓZATI CSATLAKOZÁSHOZ

PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: CONTROL STRATEGIES FOR GRID CONNECTION

Kerekes Tamás

Aalborg University, Faculty of Engineering and Science, Department of Energy; Aalborg, Denmark,
tak@energy.aau.dk;

Abstract

Renewable energy is one of the best solutions for generating clean energy. Wind and solar installations have seen a huge increase in the last decades and will be the major power production technology in the future, phasing out classical power production such as coal and gas, which result in the increase of CO₂ and other greenhouse gases. This article gives an overview on how grid connected renewable energy systems, like a photovoltaics, can play an important role in the energy supply of the future. Also it shows that such renewable energy sources need to be combined with storage in order to be able to comply with grid codes and make the energy system of the future clean and secure.

Keywords: *renewable energy, grid-connected, current control.*

Összefoglalás

A megújuló energia az egyik legmegfelelőbb megoldás a tiszta energia előállítására. A szél- és napenergia-bevezetések hatalmas növekedést értek el az elmúlt évtizedekben, és a jövőben a fő energiatermelési technológiává válnak, megszüntetve a klasszikus energiatermelést, mint a szén és a gáz, amelyek a szén-dioxid és más üvegházhatású gázok kibocsátásának növekedését eredményezik. Ez a cikk áttekintést ad arról, hogy a hálózatra kapcsolt megújuló energiarendszerek, mint például a fotovoltaikus rendszerek, hogyan játszhatnak fontos szerepet a jövő energiaellátásában. Azt is mutatja, hogy az ilyen megújuló energiaforrásokat a tárolással kombinálni kell, hogy megfeleljenek a hálózati előírásoknak, és zöldebbé, valamint biztonságossá tegyék a jövő energiarendszerét.

Kulcsszavak: *megújuló energia, hálózatra kapcsolt, áramszabályozás.*

1. Bevezetés

A megújuló energia nagyon felkapott téma volt az elmúlt két évtizedben. A teljesítmény elektronikaalapú megújuló energiás rendszerekhez, főként a szél- és napenergia-alkalmazásokhoz kapcsolódnak, ahol a szélturbinás (WT) generátor vagy a fotovoltaikus (PV) erőmű teljesítményelektronikai konverterek segítségével csatlakozik az elektromos hálózathoz. Ezekre a konverterekre azért van szükség, mert a szélgenerátorból származó váltakozó áramot (AC) vagy a fotovoltaikus erőműből származó egyenáramot (DC) állandó frekvenciájú váltakozó áramú elektromos energiává kell alakítani ahhoz, hogy a hálózathoz lehessen juttatni.

landó frekvenciájú váltakozó áramú elektromos energiává kell alakítani ahhoz, hogy a hálózathoz lehessen juttatni.

Az éves telepítéseket tekintve 2021-ben összesen 97,5 GW új szélerőművet telepítettek világszerte [1]. Ezt azonban felülmúlják az új fotovoltaikus létesítmények, mivel 2021-ben mintegy 168 GW új napelemes erőművet telepítettek [2]. A szél és fotovoltaikus rendszerek globálisan telepített kumulatív kapacitását tekintve világszerte 2021 végén 837 GW szél és 940 GW fotovoltaikus volt.

A fotovoltaikus erőműveket nézve elképzelhető, hogy csak néhány napelemes panelt telepítenek a

háztetőkre. Ez igaz a lakó- és kereskedelmi épületekre telepített rendszerek esetében, ahol az ilyen rendszerek teljesítménye néhány kWp-tól körülbelül több száz kWp-ig terjed, az épület méretétől függően.

Ennek ellenére a napelemes létesítmények elértek a GWp-kapacitást, és a termelési csúcsuk elérheti a hagyományos szélerőművek vagy akár az atomreaktorok termelését, feltéve, hogy az adott helyen napsütés áll rendelkezésre.

A legnagyobb fotovoltaikus erőművek az **1. táblázat**ban vannak felsorolva, ennek ellenére sok kisebb napelemes rendszer létezik akár több száz kWp teljesítménytartományban akár lakossági, akár kereskedelmi célú telepítésként. Ez azt jelenti, hogy manapság a villamosenergia-termelés hatalmas kapacitása nagyobb területen oszlik el („elosztott energiatermelés”), míg korábban a villamos energiát központi erőművekben állították elő, és hosszú távvezetékeken szállították a fogyasztókhoz, amelyek több száz km-re is kiterjedhettek.

1. táblázat. A világ legnagyobb fotovoltaikus erőművei

Neve	Ország	Kapacitás MW _{DC} vagy MW _{AC}	Terület km ²	Év
Bhadla Solar Park	India	2,700	160	2020
Longvangxia Dam Solar Park	Kína	2,400		2015
Huanghe Hydropower Hainan Solar Park	Kína	2,200	50	2020
Pavagada Solar Park	India	2,050	53	2019
Benban Solar Park	Egyipt	1,650	37	2019
Tengger Desert Solar Park	Kína	1,547	43	2016
Noor Abu Dhabi	Egyesült Arab Emírátságok	1,177	8	2019
Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park	Egyesült Arab Emírátságok	1,013		2020
Kurnool Ultra Mega Solar Park	India	1,000	24	2017
Datong Solar Power Top Runner Base	Kína	1,000		2016
NP Kunta	India	900		2020

A fotovoltaikus erőművek moduláris felépítésűek, és több ezer napelempanelből állnak, amelyek PV-sorokba vannak kapcsolva, majd ezeket a PV-sorokat párhuzamosan PV-tömbökbe kötik. Ezeket a PV-tömböket ezután egy PV-inverteren keresztül csatlakoztatják az elektromos hálózathoz. A legtöbb esetben az ilyen napelemes erőművek háromfázisú invertereket használnak, és egy MV/LV-transzformátor-állomáson keresztül csatlakoznak a közép feszültségű hálózathoz [3].

2. Hálózati szabályok és követelmények

A hálózatra csatlakoztatott rendszereknek meg kell felelniük a helyi elektromos hálózat tulajdonosa által meghatározott szabályoknak és követelményeknek. Ezek a követelmények meghatározzák a feszültségrendszer szimmetriáját, a feszültség amplitúdóját, a frekvencia eltérését, a hibákat és a harmonikusokat egy háromfázisú rendszerben annak érdekében, hogy a hálózatra csatlakoztatott egység ne zavarja a hálózatot, és ne legyen negatív hatással a hálózati feszültség minőségére.

Az IEEE által még 2003-ban kiadott IEEE 1547. szabvány az elosztott energiaforrások összekapcsolására és interoperabilitására tér ki, és ezen rendszerek villamos hálózatra való kapcsolására. A dokumentumban azt olvashatjuk, hogy a hálózatra csatlakoztatott átalakító [4]:

- nem szabályozhatja aktívan a feszültséget
- az elektromos hálózat rendellenes feszültsége vagy frekvenciája esetén nem maradhat a hálózatra csatlakozva.

Ezen szabály azért volt érvényben, mert abban az időben mindössze 2,8 GWp napelemes és 39 GW szélerőmű-létesítmény volt világszerte, ami a teljes energiatermelésnek csak nagyon kis hányadához járult hozzá.

Az energiatermelésben a megújuló energia arányának növekedésével a hálózati szabványok is fejlődtek. 2014-ben frissítették az IEEE 1547. szabványt, és megemlítették, hogy a hálózathoz csatlakoztatott konverter:

- aktívan szabályozhatja a feszültséget
- abnormális feszültségen vagy frekvencián csatlakozva maradhat
- frekvenciaválaszt biztosíthat

Ez azt jelenti, hogy a hálózatra kapcsolt rendszerek immár képesek az elektromos hálózatot kiegészítő szolgáltatásokkal támogatni, ezáltal erősebbé, jobbá és biztonságosabbá teszik az elektromos hálózatot.

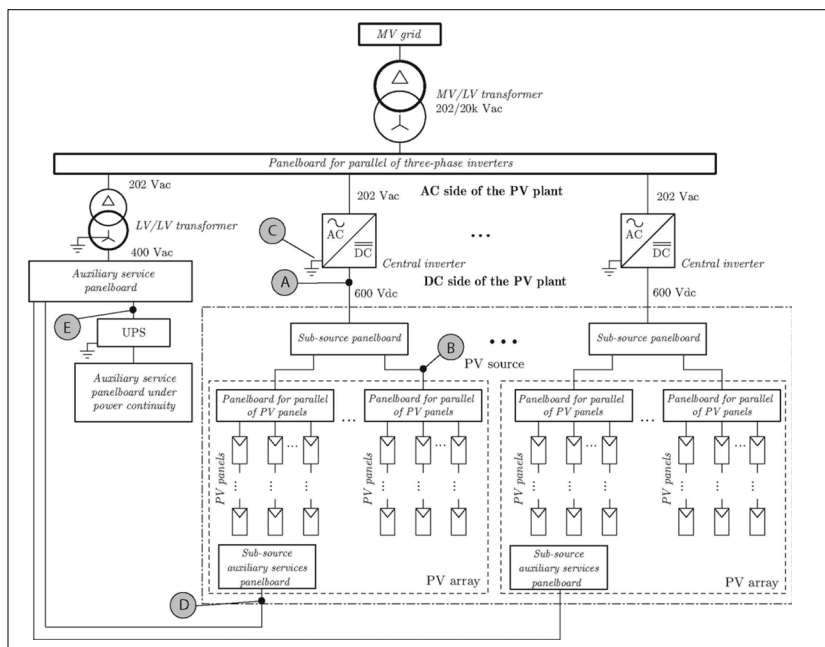
A telepített megújulóenergia-rendszerek számának folyamatos növekedésével 2018-ban ismét frissült az IEEE 1547. hálózati kód követelmény, ahol megemlítik, hogy a hálózatra kapcsolt rendszernek a következőket kell teljesíteni:

- képesnek kell lennie a feszültség aktív szabályozására
- kapcsolódva kell maradnia akkor is, ha az elektromos hálózat paraméterei abnormális

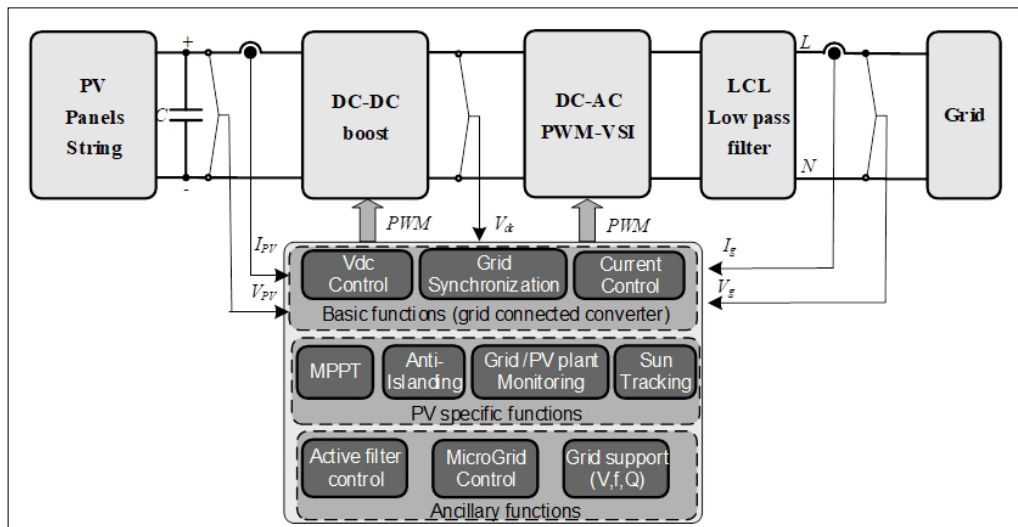
lis feszültség-/frekvenciaértékeket mutatnak

– képesnek kell lennie frekvenciaválaszra

Ezekkel a járulékos szolgáltatásokkal a hálózatra kapcsolt konverterek aktívan részt vesznek a hálózatban, nemcsak áramot szolgáltatva, hanem az aktuális hálózati paraméterek függvényében alakítják viselkedésüket, ugyanúgy, ahogy a hagyományos erőművek tennék.



1. ábra. Egy PV-erőmű egyvonalas diagramja



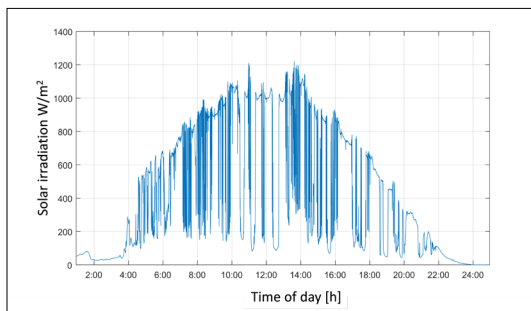
2. ábra. Vezérlőhurok egy hálózatra csatlakoztatott áramirányító alkalmazásban

Az ilyen speciális PV-funkciók biztosítják, hogy a PV-tömb optimális körülmények között működjön, miközben betartják a specifikus szabványokban meghatározott hálózati kódokat és követelményeket.

A hálózatra csatlakoztatott konverterben a hálózati áram szabályozásához két hurokra van szükség. A **3. ábrán** látható a külső hurok (PQ-szabályozó), amely kiszámítja a szükséges áramreferenciákat (i_d^* és i_q^*) az aktív (P^*)- és reaktív (Q^*)-teljesítmény-referenciák alapján. A kiszámolt áram-referenciaértékek felhasználásával a **3. ábrán** látható belső hurok (áramszabályozó) kiszámítja a szükséges feszültségreferenciákat a kétfázisú szikron koordináta-rendszerben, majd ezeket a stacionárius háromfázisú koordináta-rendszerbe transzformálja. Ezt a háromfázisú referenciafeszültség-rendszert használja fel az impulzusfeszültség-modulátor a háromfázisú konverter tranzisztorvezérlő jeleinek az előállítására, amelyek a háromfázisú teljesítmény elektronikai konvertertranzisztorait vezérlik, ahogy azt a **3. ábra** is mutatja.

Az áram és a teljesítmény szabályozása csak egyike azon feladatoknak, amelyeket a hálózatra csatlakoztatott rendszereknek el kell végezniük. A hálózati kódok azt is meghatározzák, hogy a betáplált teljesítmény milyen gyorsan változhat, amikor a rendszer a hálózathoz van csatlakozva. Ennek célja az áramingadozások korlátozása, amelyek negatívan befolyásolják a hálózat biztonságát. Figyelembe véve, hogy a napelemes rendszerekben nincs tehetetlenség, mint amit a nagy generátorokban a forgó tömeg adna, a kapott napfény intenzitásában bekövetkező bármilyen változás közvetlenül látható lesz az átalakító kimeneti teljesítményén, és ez nagyon meredek teljesítményingadozásokhoz vezet.

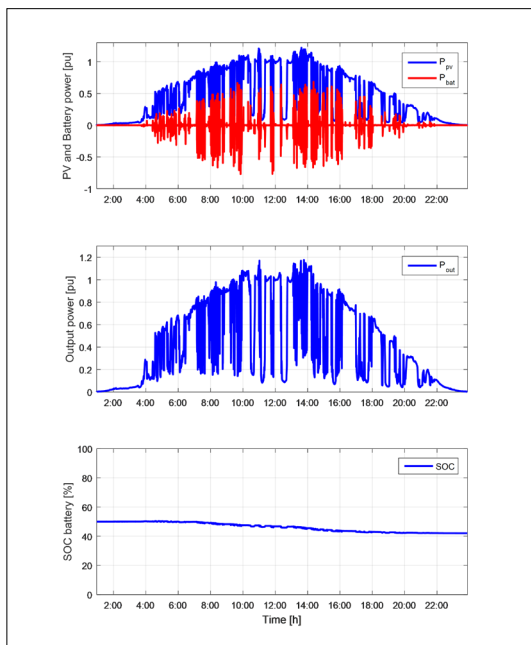
Egy ilyen forgatókönyvet szimuláltunk egy 5,7 kW-os PV-rendszerrel. Amint az **5. ábrán** látható, a napelemes rendszer kimenő teljesítménye a napfény mintáját követi, és feszültség-ingadozást okoz az elektromos hálózaton. Ez egy nemkívánatos mellékhatás, és a teljesítményváltozást korlátozni kell. Míg a növekedési sebesség korlátozható pusztán a konverter kimenő teljesítményének korlátozásával és leszorításával, addig a csökkenési sebességnem korlátozható, mivel ehhez a teljesítményelektronikai konverterben tárolt energia nem elegendő. Ez azt jelenti, hogy az ilyen forgatókönyvek során a PV-rendszer nem fogja teljesíteni a hálózati előírásokat és követelményeket.



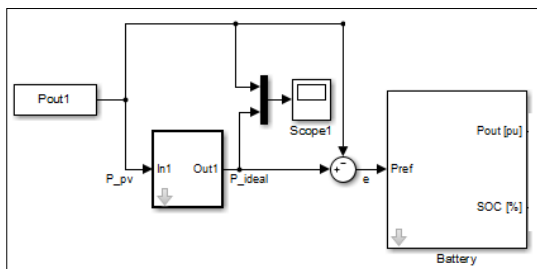
4. ábra. Napsugárzási profil egy napsütéses napon, átvonuló felhőkkel

Az ilyen teljesítményingadozások tárolással, akkumulátoros rendszer formájában korlátozhatók. Ebben a konkrét esetben, ha 10 kW-os és 2,5 kWh-s akkumulátorrendszert használunk, akkor az akkumulátorfelügyeleti rendszertől (BMS) függően az ingadozás olyan szintre korlátozható, amely a hálózati kódok által meghatározott határokon belül van. Egy ilyen rendszer modelljét a **6. ábra** mutatja, a hibrid rendszer kimenő teljesítményének eredményeit pedig a **7. ábra**.

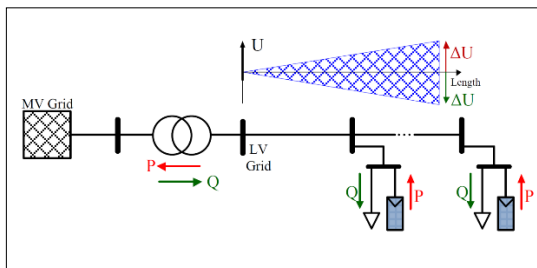
Az **5. ábra** és a **7. ábra** eredményeit összehasonlítva látható, hogy a P_{out} – kimeneti teljesítmény – ingadozásai csökkennek az energiatároló használatakor, mivel az akkumulátor szűri és kompenzálja a napelemből származó teljesítményin-



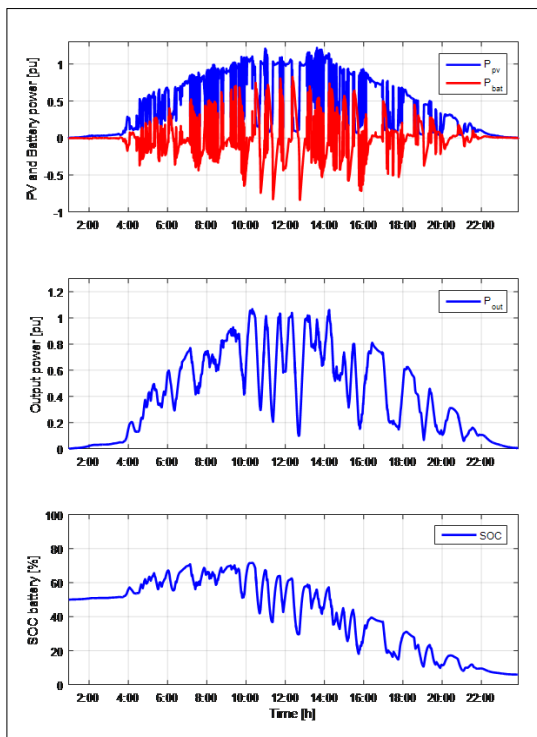
5. ábra. A fotovoltaikus rendszer P_{out} kimeneti teljesítményének változása egy napsütéses napon, felhőátvonulások esetén



6. ábra. PV-energiatermelés akkumulátoros energia-tárolással



7. ábra. Az alacsony feszültségű hálózat impedanciájának befolyása a hálózati feszültségre



8. ábra. Szimulációs eredmények, amelyek a PPV-PV-teljesítményt, a Pbat-akkumulátor teljesítményét, a rácsba injektált Pout-teljesítményt és az akkumulátor töltöttségi állapotát (SOC) mutatják

gadozásokat. Továbbá, ha figyelembe vesszük a kábelek impedanciáját, amelyek a PV-rendszer és az alacsony feszültségű (LV) elosztó transzformátor között találhatók, akkor ezek a teljesítményingadozások feszültségingadozásokhoz is vezetnek, amelyeket szintén szabályoz a hálózati előírás. Ezeket a feszültségingadozásokat a megnövekedett aktív teljesítmény (P) okozza, és a meddőteljesítmény (Q) segítségével kompenzálhatók. Ez azt jelenti, hogy a PV-konvertert annak megfelelően kell méretezni, hogy a tranzisztorok névleges áramerőssége minden forgatókönyv esetén képes legyen az aktív és a meddő teljesítmény kombinált áramának elvezetésére.

4. Következtetés

A megújuló energia az egyik legjobb megoldás a tiszta energia előállítására. A szél- és napenergia-berendezések hatalmas növekedést értek el az elmúlt évtizedekben, és a jövőben a fő energiatermelési technológiává válnak, megszüntetve a klasszikus energiatermelést, mint a szén és a gáz, amelyek a CO₂ és más üvegházhatású gázok kibocsátásának növekedését eredményezik. A megújuló energia időszakossága azonban kihívást jelent. Ezért a különböző megújuló energiaforrásokat energiatárolási megoldásokkal kell kombinálni, hogy az energiatermelés a jövőben is sikeres legyen.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1]. Global Wind Energy Council: *Global Wind Report 2022*;
- [2]. *Global Market Outlook for Solar Power 2022–2026*; SolarPower Europe; ISBN NUMBER 9789464518610;
- [3]. Araneo R., Lammens S., Grossi M., Bertone S.: *EMC Issues in High-Power Grid-Connected Photovoltaic Plants*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 51/3. (2009) 639–648.
- [4]. *IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*; IEEE 1547;
- [5]. Teodorescu R., Liserre M., Rodríguez P.: *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. John Wiley & Sons Ltd. 2010.
<https://doi.org/10.1002/9780470667057>