

NAPELEMES SZÜNETMENTES ASZINKRON MOTORHAJTÁS SZIGETÜZEMŰ INVERTERREL

Boros Rafael Ruben – Bodnár István

Abstrakt: A tanulmány egy szünetmentes aszinkron motoros hajtást mutat be, amely egy szigetüzemű napelem invertert is tartalmaz. A cikk kiemeli a két rendszer kombinálásának előnyeit és a szükséges rendszerelemeket. Ezenkívül bemutatja a teljes harmonikus torzítást és a működési paramétereit a különböző rendszertopológiákban. Az eredmények MATLAB szimuláció alapján jöttek létre.

Abstract: The study presents an uninterruptible induction motor drive, a combination of an off-grid solar inverter. The article highlights the advantages of combining the two systems and the necessary system elements. It also presents the total harmonic distortion and operating parameters for different system topologies. The results were obtained based on simulations of MATLAB.

Kulcsszavak: inverter, LLC konverter, napelem, MATLAB, szünetmentes aszinkron motorhajtás, szigetüzemű

Keywords: inverter, LLC converter, photovoltaic, MATLAB, uninterrupted induction motor, off-grid

1. Bevezetés

Hazánkban az elmúlt időszakban nagy változások történtek a napelemes rendszerekre vonatkozóan. Jelentős szabályozási változás történt a nem háztartási méretű kiserőművek (HMKE), naperőművek beépítésének feltételrendszerében, akár hálózatra, akár saját fogyasztásra termelő (visszwatt-védelmes) erőművekről van szó. A visszwatt védelem lényege, hogy a napelemes rendszer által megtermelt pillanatnyi energia nem lehet nagyobb, mint az adott vételezési ponton vételezett energia. Egyszerűbben fogalmazva egy napelemes rendszer csak annyit termelhet (úgy kell szabályozni) amennyit a felhasználó pillanatnyilag igényel, nem táplálhat vissza a közüzemi hálózatra. Visszwatt-védelemre akkor van szükség, ha 50 kW alatt középfeszültségen van vételezés, vagy 50 kW felett, ha fogyasztás csökkentésére szeretnénk használni a rendszert (Wattler, 2023).

Ezentúl a hálózatra kapcsolt termelőknek (és tárolóknak) kiegyenlítőenergia-szabályozási képességekkel kell rendelkeznie (amit a MAVIR bármikor lekapcsolhat) és az időjárásfüggő erőműnek emellett legalább a beépített teljesítmény 30%-nak megfelelő le-felszabályozási rendszerkapacitásról kell gondoskodnia (akkumulátor vagy egyéb), amit saját maga vagy harmadik fél is kielégíthet. 2022. október 21-ét követően a visszwattos napelemek esetén is mindkét feltételnek meg kell felelni. Az új szabályokat a MAVIR Üzemi Szabályzat 2022. július 15-én hatályosult 28. számú, és azt követően 2022. október 21-én hatályosult 29. számú módosítása tartalmazza. Az Üzemi Szabályzatra hivatkozva a MAVIR lekapcsolhatja a hibrid inverterek hálózatba való táplálását, ennél fogva a hibrid inverter képessége egy szigetüzemű napelem inverterre korlátozódik. Emiatt érdemes megfontolni a hibrid inverterek mellőzését, mivel a megtérülési idejük is jelentősen megnő, ha rövidebb időkre is a betáplálást tiltják (Wattler, 2023).

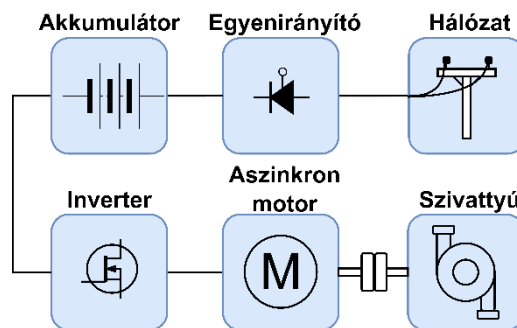
2. Szünetmentes aszinkron motorhajtás

a) Konvencionális hajtás

Az ipar számos helyén elengedhetetlen a szünetmentes energiaellátás. Erre a célra szünetmentes tápegységeket alkalmaznak, amelyek inverteren keresztül, akkumulátorból fedezik a fogyasztó felé a villamosenergiát, ha nincs hálózati feszültség. Speciális esetekben motoros hajtásokhoz is építenek be szünetmentes frekvenciaváltókat. Olyan helyeken érdemes használni ezeket a rendszereket, ahol folyamatos üzemre van szükség, például egy fűtés rendszerben alkalmazott keringtető szivattyú esetén (Junling et al., 2010). Ipari körülmények között egy turbina olajozását működtető szivattyú is kiváló példája ennek. Ilyen célok esetén háromfázisú aszinkron motor beépítése célszerű az alacsony karbantartás igény miatt (Hannan et al., 2018). Meghajtásához háromfázisú frekvenciaváltó szükséges. Amennyiben szünetmentes kivitelre van szükség, akkumulátorokat kell beépíteni a frekvenciaváltóban található inverter előtti közbenső egyenáramú körbe. Természetesen ehhez akkumulátoröltő és figyelő, védelmi áramkörök stb. szükséges. Az ilyen kész berendezéseket most már néhány cégtől egybe be lehet szerezni. Azonban érdemes fontolóra venni a napelemes rendszer integrálását a szünetmentes aszinkron motor hajtásba, ugyanis az akkumulátorokat napelemek segítségével tölteni lehet.

Az 1. ábra egy hagyományos szünetmentes aszinkron motorhajtást szemléltet. A hálózat egyenirányítón keresztül tölti az akkumulátorokat, és egyben egyenfeszültséggel látja el az invertert. Az inverter hajtja az aszinkron motort, amelyet egy gép (pl. szivattyú) terhel. Hálózatkimaradáskor a DC sín (közbenső egyenáramú kört) és a motort nem az egyenirányító látja el, hanem az akkumulátor.

1. ábra: **Konvencionális szünetmentes aszinkron motorhajtás.**



Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

b) Napelem, mint kiegészítő táplálás

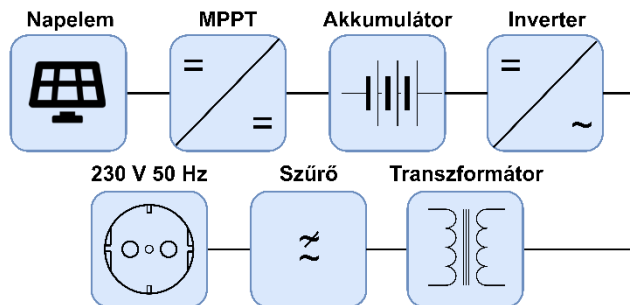
Érdemes megfontolni a napelemes rendszer integrálását a szünetmentes aszinkron motoros hajtásba, mert az akkumulátorok napelemek segítségével tölthetők. Hosszabb hálózati kimaradás esetén a napelemek további üzemidőt tudnak biztosítani a motornak. Ha egy fázisra (230 V 50 Hz-es feszültség) is szükség van

megszakítás nélkül, akkor érdemes több panel telepítését elvégezni, ilyenkor egyszerűen csatlakoztatható egy szigetüzemű inverter az akkumulátorokhoz és az egyenirányítóhoz. Ha az egyenirányító ki van kapcsolva, akkor olyan üzemállapot is elérhető, ahol az akkumulátort és a motort csak a napelemek táplálják (Boros–Bodnár, 2022).

3. Szigetüzemű inverterek

A napelemes szigetüzemű invertereket (2. ábra) széles körben alkalmazzák (Tan et al., 2020). Az inverter bemenete legtöbbször kisfeszültséget igényel (12 V, 24 V, 36 V ...), és a feszültséget a kimeneten lévő transzformátor segítségével 230 V-ra emeli. Az invertert akkumulátorhoz kell csatlakoztatni, amelyet a napelemek egy MPPT (Maximum Power Point Tracking) szabályozón keresztül látnak el. Ritka az olyan szigetüzemű inverterek alkalmazása, ahol az inverter bemenete közvetlenül csatlakozik egy napelemhez úgy, hogy akkumulátor nincs beépítve. Az MPPT szabályozó egy DC/DC átalakító, amely a napelem maximális munkapontjától függően változtatja a feszültséget a kimenetén. Az inverter bemeneti feszültségének változása és a kimeneti terhelés változása a szabályozóköri miatt nagy feszültség ingadozást vagy oszcillációt okoz a kimeneten.

2. ábra: Napelemes szigetüzemű inverter.



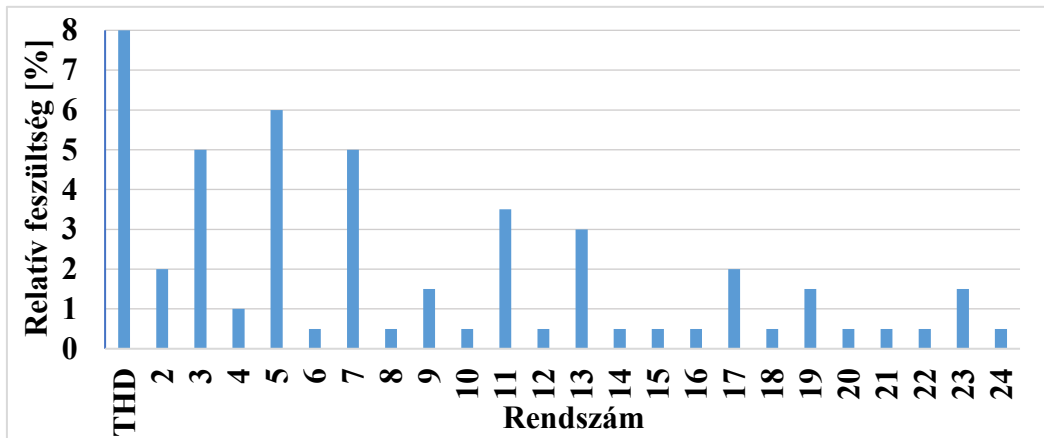
Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

A transzformátor kimenetére kondenzátor csatlakozik, a transzformátor induktív jellege miatt a kondenzátorral együtt LC aluláteresztő szűrőt alkotnak. Az aluláteresztő szűrő a kapcsolási frekvencia (pl. $f_{sw} = 20$ kHz) szűrésére szolgál a kimeneten. Az aluláteresztő szűrők csillapítása nem végtelen, így a kimeneti feszültség nem lesz tisztán szinuszos. A nem tiszta szinuszos mennyiségeket a THD (Total Harmonic Distortion) jellemzi. A THD az összes harmonikus frekvencia ekvivalens négyzetes (RMS) feszültségének az alapfrekvencia RMS feszültségéhez viszonyított aránya (1. képlet) (MSZ EN 50160, 2020).

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n U_k^2}}{U_1} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \quad (1)$$

Az EN 50160 szabvány szerint a feszültség THD-nak 8%-nál kisebbnek kell lennie ($n = 40$ rendszámig, 1 kV alatt, 10 perces átlagértékkel). A szabványban egy táblázat tájékoztat részletesebben, hogy az adott sorrendű harmonikusok milyen relatív feszültséghatárt érhetnek el százalékban. Azonban a táblázat csak a 25. rendű harmonikusig tárgyalja a relatív eltéréseket (3. ábra). Egyes országokban ezeket az értékeket egyedileg határozzák meg, például Norvégiában ($\text{THD}_{\max} = 3\%$).

3. ábra: Az EN 50160 szabványban megfogalmazott harmonikusok.



Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

Az inverterek általában garantálják, hogy a THD kisebb, mint 8% legyen. A 3%-nál kisebb értéket garantáló inverterek jóval drágábbak. Az inverterben lévő transzformátor felharmonikusokat állít elő, de a feszültségnövelés miatt ez nem hagyható ki. Az AC feszültség nullátmeneténél nagyobb a torzítás, mint a többi fázisszögnél. Ennek oka a kapcsoló félvezetők nyitási irányú feszültségesése. IGBT esetén ez 1-3 V között van, MOSFET-eknél ez erősen az áramerősségtől függ.

A szabvány azt is előírja, hogy a feszültség flicker 1 kV-os feszültség alatt nem lehet nagyobb, mint 5%. Ez azt jelenti, hogy a flicker értéke $\pm 11,5$ V lehet. A tranziens szimuláció esetében sem fordult elő nagy feszültségflicker.

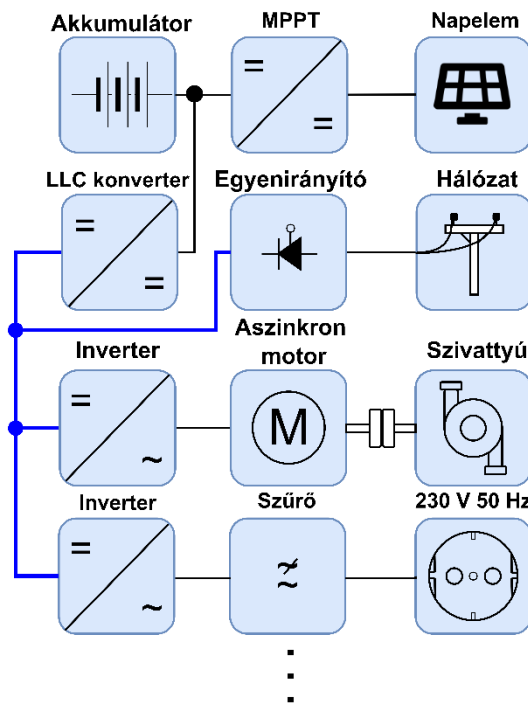
4. Szünetmentes aszinkron motorhajtásba integrált szigetüzemű inverter

Érdemes olyan rendszereket telepíteni, ahol az inverter bemenete nagyobb egyenfeszültségre van kötve, így a transzformátor elhagyható. Emiatt csökken a harmonikus tartalom, és az áramkör is költséghatékonyabb lesz. Természetesen a DC áramkör kialakítása drágább, de nagy előny, hogy a DC áramkörre tetszőleges számú inverter csatlakoztatható, ennek csak a DC áramkör maximális teljesítménye szab határt.

A 4. ábra a szünetmentes motorhajtásba integrált szigetüzemű invertert mutatja. A napelem egy MPPT vezérlőt használ az akkumulátorok hagyományos módon történő töltésére. A DC/DC átalakító a kívánt értékre növeli az akkumulátor feszültségét (min. 330 VDC 230 VAC esetén). A kimenet univerzális egyenfeszültségű áramkörnek tekinthető. Különböző inverterek csatlakoztathatók

hozzá, valamint további DC/DC átalakítók a névleges teljesítmény növelésére. A hálózati egyenirányító is ehhez az univerzális egyenfeszültségű áramkörhöz csatlakozik. Ha az akkumulátorok lemerülnek, mert nincs elegendő napsugárzás, az egyenirányító teljes mértékben ellátja a fogyasztókat. Áramszünet esetén a fogyasztók ellátása a DC/DC átalakító segítségével történik. Áramszünetkor az egyenáramú áramkörben nem lépnek fel nagy tranziensek, mivel pufferkondenzátorok vannak beépítve, és ezek kisimítják a feszültségletöréseket. Továbbá az LLC konverter szabályozója azonnal beavatkozik ebben az esetben és átveszi a DC kör szabályzását (Boros–Bodnár, 2022).

4. ábra: Szünetmentes aszinkron motorhajtásba integrált szigetüzemű inverter.



Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

Lehetőség van olyan üzemállapotra is, hogy a napelem és a hálózat egyszerre táplálja a fogyasztókat, amelynek aránya szintén beállítható (Boros–Bodnár, 2022). Ebben az esetben az egyenfeszültség átlagértéke a (2. képlet) szerint számítható.

$$U_{\text{ÁTL}} = \frac{3}{2\pi} \left(\int_{\alpha}^{\alpha_{ki}} \sqrt{2} \cdot U_V \cdot \sin \omega t \, d\omega t + \int_0^{\frac{2\pi}{3} - (\alpha_{ki} - \alpha)} U_0 \, \omega t \, d\omega t \right) \quad (2)$$

ahol:

U_0 = az egyenfeszültség pillanatnyi értéke

U_V = a hálózat vonali feszültsége

α = az egyenirányító gyújtási szöge

α_{ki} = a kikapcsolási szög

Természetesen ez a számítás akkor igaz, ha nem tartalmaz az egyenáramú kör pufferkondenzátort. Az α , az egyenirányító gyújtási szöge a természetes kommutációs ponttól mért villamos szöget, α_{ki} (3. képlet) a kikapcsolási szöget jelenti, ahol az áram megszakad. A kikapcsolási szög az egyenfeszültség és a hálózati feszültség pillanatnyi értékének metszéspontját jelenti.

$$\alpha_{ki} = \arcsin\left(\frac{U_0}{\sqrt{2} \cdot U_{vonali}}\right) \quad (3)$$

Ha a hálózati feszültség 400 V és az egyenfeszültség 330 V, akkor a metszéspont $144,27^\circ$ lesz. Ettől kisebb gyújtási szöget kell alkalmazni, hogy az egyenfeszültség átlagértéke minimálisan növekedjen. Ha ez bekövetkezik, az LLC konverter szabályozója csökkenti a kimeneti feszültséget és egyensúlyt biztosít. Azonban a szabályozókörnél van minimális hibája, ezért nem pillanatszerűen kompenzálja a feszültség változást. Ennek következménye a minimális feszültségemelkedés, és így a hálózat és a napelem egyidejűleg táplálja az egyenáramú kört. Ha $\alpha = 141^\circ$, akkor az egyenfeszültség a 2. képlet szerint csak 330,12 V-ra emelkedik, simító kondenzátorok nélkül. Ez a rendszer megfelel a visszawatt-védelem követelményeinek is, mivel az egyenirányító nem tud áramot vezetni a hálózat felé (félíg szabályozott egyenirányító esetén). Erre természetesen csak a bevezetőben említett esetekben van szükség.

5. Szimulációk

A szimulációk célja az egyfázisú inverter kimenetén a teljes harmonikus torzítás változásának vizsgálata különböző működési feltételek mellett. Továbbá az is fontos szempont, hogy az aszinkron motor működési paramétereinek változtatása milyen mértékben befolyásolja az egyenfeszültségű hálózatot és a harmonikusokat az egyfázisú inverter kimenetén.

a) Az egyfázisú inverter felharmonikusainak vizsgálata

Az első szimuláció arra összpontosít, hogy az egyfázisú inverter kimenetén a harmonikusok hogyan változnak a bemeneti egyenfeszültség változásának hatására. Kétféle inverter került leszimulálásra, az egyik transzformátoros kimenettel, a másikat transzformátor nélküli LC aluláteresztő szűrő kialakítással rendelkezett. Az 1. táblázat a teljes harmonikus torzítást, a kimeneti feszültség nagyságát a bemeneti feszültség függvényében írja le.

A táblázat eredményei alapján egyértelműen látható, hogy a transzformátoros kimenetű inverter nagymértékben növeli a felharmonikus tartalmat. Az is jól látható,

hogy minél kisebb a feszültség, annál nagyobb a THD. Ez főként a kapcsoló félvezetők (IGBT) nyitóirányú feszültségeséséből adódik.

A szimulációs adatokból az is kimutatható, hogy az IGBT meghajtóáramkörben alkalmazott holtidő is nagyban befolyásolja a teljes harmonikus torzítást (Jiao et al., 2019). A szimulációban a holtidő 350 ns-ra volt beállítva.

1. táblázat: Egyfázisú inverter teljes harmonikus torzítása a bemeneti feszültség függvényében

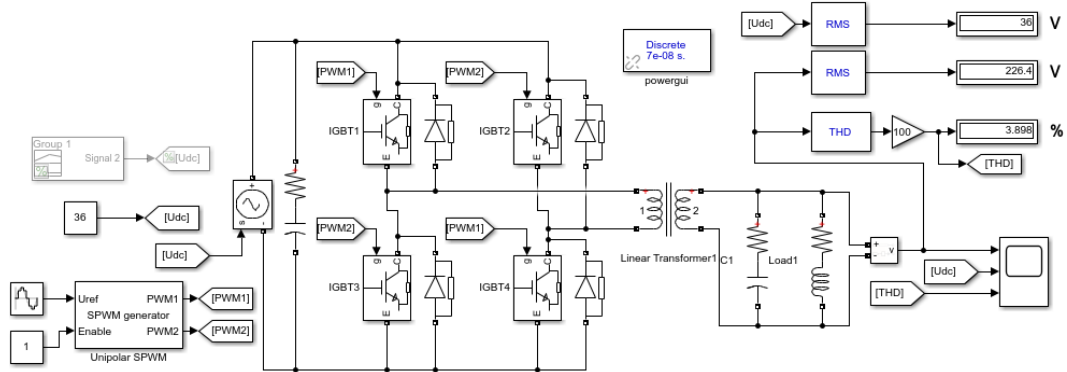
Bemeneti egyenfeszültség [V]	Transzformátor nélkül		Veszteségmentes transzformátorral	
	THD [%]	Váltakozó feszültség [V]	THD [%]	Váltakozó feszültség [V]
12	5,13	5,32	14,61	51,98
24	2,8	13,66	7,23	136,1
36	2,07	22,04	4,92	220,6
37	2,01	22,73	4,88	227,5
48	1,75	30,42	-	-
60	1,56	38,8	-	-
72	1,47	47,15	-	-
100	1,34	66,71	-	-
150	1,21	101,6	-	-
200	1,19	136,6	-	-
250	1,17	171,5	-	-
300	1,16	206,4	-	-
330	1,15	227,3	-	-
350	1,14	241,2	-	-

Forrás: saját kutatás adatai alapján a szerző szerkesztése.

Az 5. ábra mutatja a szimulációs elrendezést, ahol az inverter transzformátoros kivitelű. A transzformátor veszteségmentes, és a feszültséget egy kondenzátor simítja a kimenetén. Mind a transzformátorral, mind a transzformátor nélküli inverterek nem tartalmaznak szabályozót, így a kimeneti feszültség nagysága a terheléstől és a bemeneti feszültségtől is függ. A gyakorlatban a transzformátorok ferrit maggal vannak szerelve, mivel az inverter kimenetén a kapcsolási frekvencia 20 kHz körüli értékre van beállítva. A szimuláció során a transzformátor primer és a primerre vonatkoztatott paraméterei zérus, csak a vasvesztésüket szimbolizáló ellenállást szükséges beállítani. A felharmonikus tartalom csökkenthető természetesen a kimeneten alkalmazott hiszterézises szabályozóval.

Összességében megállapítható, hogy olyan invertert érdemes használni, ahol a bemeneti feszültség a lehető legmagasabb a teljes harmonikus torzítás szempontjából. Ennélfogva elegendő kisebb szűrő használata, és emiatt az áramkör mérete csökken.

5. ábra: Egyfázisú inverter szimulációs elrendezése.

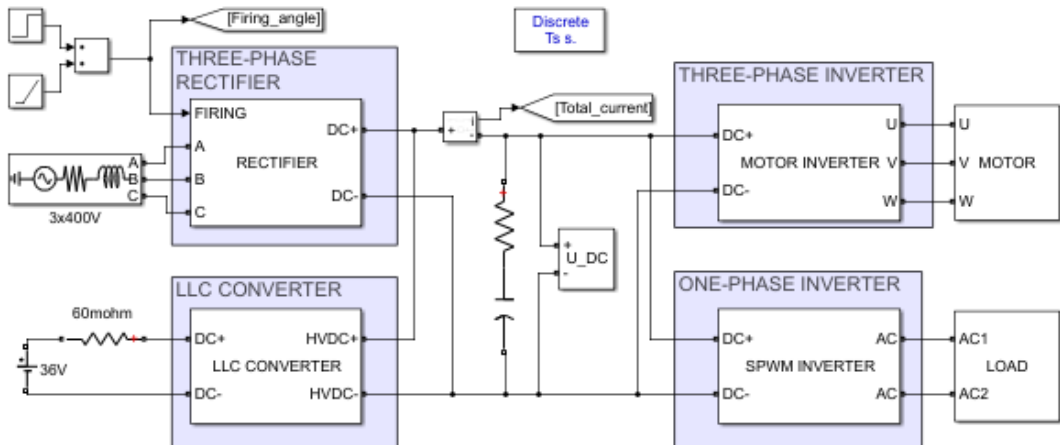


Forrás: a szerző szerkesztése.

b) Napelemes szünetmentes aszinkron motorhajtás szigetüzemű inverterrel

A 6. ábrán látható elrendezés alapján került leszimulálásra a napelemes szünetmentes aszinkron motorhajtás szigetüzemű inverterrel. Az egyenirányító egy háromfázisú félig-vezérelt kivitelű, 3×400 V-os hálózatról táplálva. Az egyenirányító gyújtási szöge tetszőlegesen beállítható. Az egyenirányító kimenete az univerzális egyenáramú áramkörre van csatlakoztatva, amelyet egyidejűleg még az LLC DC/DC feszültségnövelő konverter is táplál. Az univerzális DC sínhez csatlakozik az egyfázisú inverter, amely 230 V váltakozó feszültséget állít elő, és a háromfázisú inverter egy $P_{\text{mech}} = 270$ W-os aszinkron motort hajt meg. Az egyfázisú inverter egy RL fogyasztót táplál ($R = 230 \Omega$, $L = 4$ mH). A fogyasztó előtt alkalmazott LC aluláteresztő szűrő paraméterei a következők: a $C = 2 \mu\text{F}$ kondenzátor $R = 0,04 \Omega$ soros ellenállással, az $L = 3,3$ mH induktivitás $R = 0,14 \Omega$ ellenállással. Háromféle szimuláció futott le a fent leírt elrendezéssel.

6. ábra: Napelemes szünetmentes aszinkron motorhajtás szigetüzemű inverterrel.

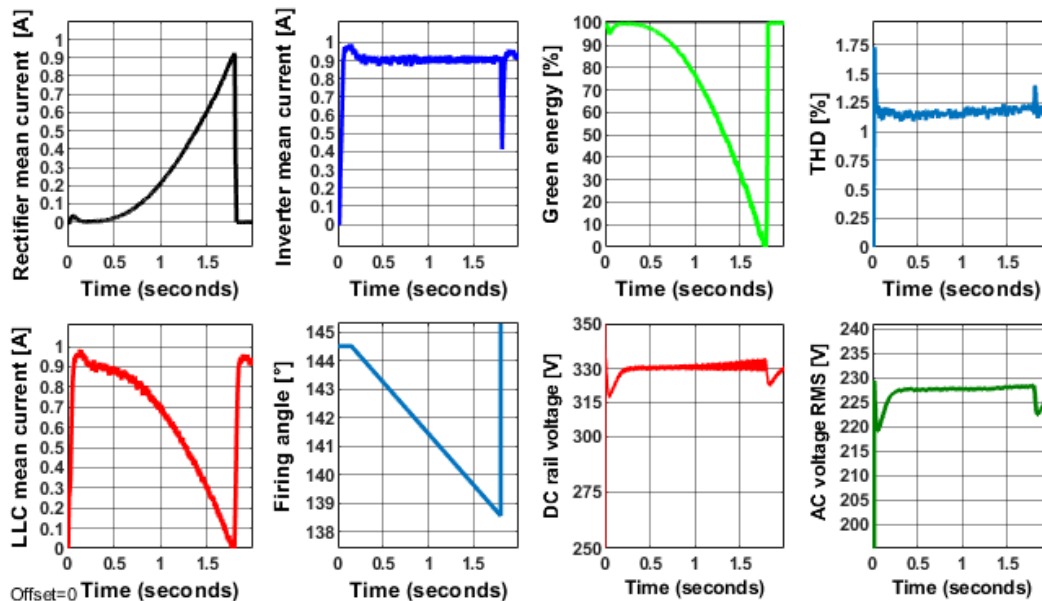


Forrás: a szerző szerkesztése.

1) Egyfázisú inverter kimenetén mért THD a gyújtásszög függvényében

Az első szimulációban a cél az volt, hogy kimutatásra kerüljön az egyfázisú inverter kimenetén mért teljes harmonikus torzítás az egyenirányító gyújtásszögének függvényében. A szimulációs eredmények a 7. ábrán láthatók. A szimuláció kezdetekor a bekapcsolási tranziens után a gyújtási szög 144,5 fokról csökken folyamatosan. Ennek eredményeképpen az LLC konverter kimenetén és az egyenirányító kimenetén mért áramok aránya megváltozik. Ezt az arányt zöld energiával jelöli a kutatás. A gyújtási szög megváltoztatása az egyenfeszültség változásával jár, de az LLC átalakító szabályozó áramköre ezt korrigálja. A feszültség átlagértéke nem változik, de a feszültség hullámszáma nő, miközben a gyújtási szög csökken, azonban ez elhanyagolható hatással van a THD-ra.

7. ábra: THD a gyújtásszög függvényében.



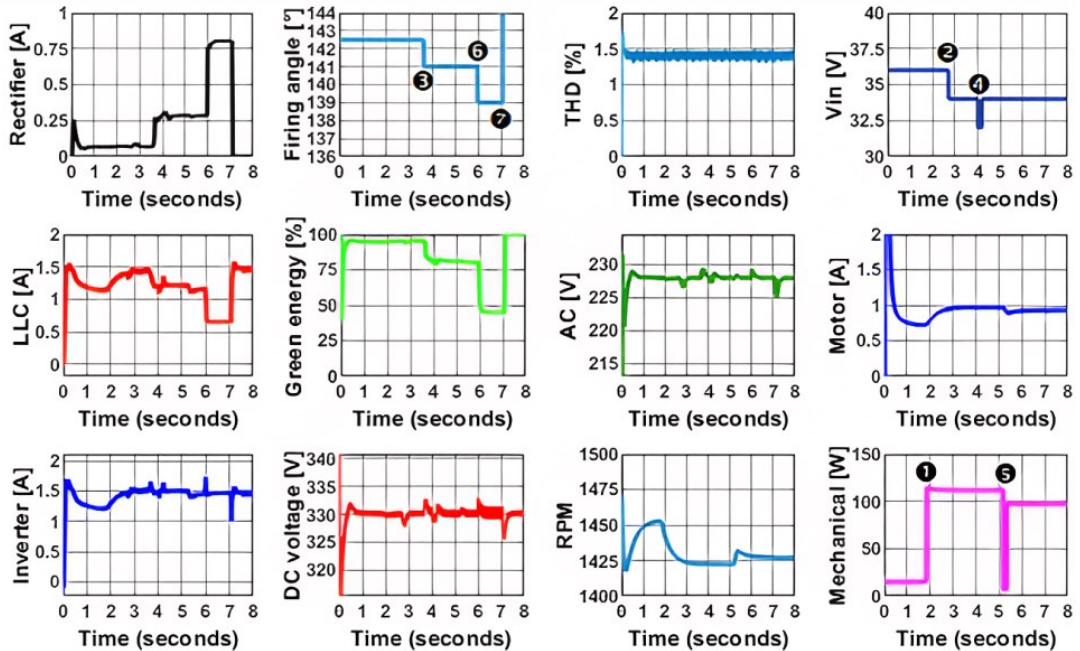
Forrás: a szimulációs eredmények alapján a szerző szerkesztése.

A szimuláció végén a gyújtási szög hirtelen megnő, ezzel szimulálva a hálózatkimaradást. Az egyenfeszültség hirtelen leesik, így a kimeneti váltakozó feszültség is csökken, de ez a tranziens érték a szabványos határértékeken belül marad. Megállapítható, hogy a zöld energia mennyiségének változása is minimális hatással van a THD-re.

2) Tranziensek szimulációja

Ez a fejezet a szünetmentes motorhajtás összes lehetséges tranziensét megvizsgálja. A szimuláció célja az univerzális egyenfeszültség, a motor fordulatszámának, az egyfázisú terhelés feszültségének és THD-jének változásának vizsgálata a lehetséges zavarok esetén. Kezdetben a szimuláció (8. ábra) az univerzális egyenfeszültséget simító kondenzátor 330 V-ra történő feltöltésével kezdődik, ami jelentősen lerövidíti a szimulációs időt. A gyújtásszög 142,5 fokra van deklarálnva, így kezdetben az LLC konverter táplálja a fogyasztókat. Az aszinkron motor kezdetben csak minimális súrlódási és ventilációs nyomatékkal van terhelve, így teljesítménye minimális.

8. ábra: Tranziensek szimulációja.



Forrás: a szimulációs eredmények alapján a szerző szerkesztése.

Miután a motor elérte a stabil fordulatszámot, dinamikus terhelés lép fel a tengelyén, így a teljesítményfelvétele is megnő. Ez látható az ábrán az első pontnál. A teljesítményfogyasztás nem azonnal jelentkezik, mert a fordulatszám a tehetetlenségi nyomaték miatt nem csökken azonnal. A hirtelen nyomatéknövekedés nem okozott változást az univerzális egyenáramú körben, mert az LLC konverter szabályozója megfelelően kompenzálta azt.

A második zavar az LLC konverter bemenetén következett be, ahol a bemeneti feszültség 36 V-ról, 34 V-ra esett. Ez a változás minimális feszültségcsökkenést eredményezett az univerzális egyenfeszültségű körben.

Miután a motor fordulatszáma ismét stabilizálódott, az egyenirányító gyújtási szöge csökkent (3. pont), így a zöld energia aránya kisebb lett. A gyújtási szög hirtelen változása nem célszerű, mert az LLC átalakító szabályozója nem tudja azonnal kompenzálni, így az egyenfeszültség kissé eltér az alapjeltől. A megváltozott feszültség az LLC átalakító bemenetén is ugyanezt eredményezi, mint a 4. pontban.

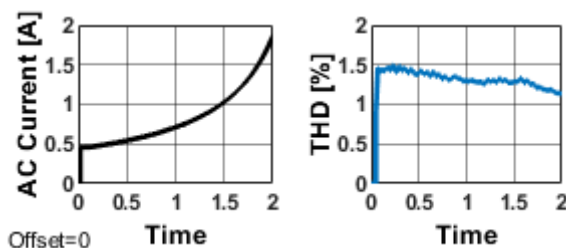
A motor terhelése hirtelen csökken az 5. pontban, az 1. ponthoz hasonlóan, nem zavarja meg nagymértékben az univerzális egyenfeszültség nagyságát. A legnagyobb tranzienseket a gyújtásszög nagy változásai okozzák, mint a 6. és 7. pontban. A 7. pont egy hálózatkimaradást szimulál. Ennek hatására a motor fordulatszáma azonban nem változott meg.

A THD mindvégig stabil volt, azonban a váltakozó feszültségben történt ingadozás, de az előző szimulációhoz hasonlóan a szabványos értéken belül maradt.

3) Egyfázisú inverter kimenetén mért THD a terhelés változásának függvényében

A tranziensek vizsgálata nem ismertette a THD változását az egyfázisú inverter kimenetén a terhelés változásának függvényében. A terhelés változása ugyanúgy befolyásolja az univerzális egyenáramú kört, mint a motor terhelőnyomatékának változása. Az egyfázisú inverter kimenetén a terhelés változásától függően a THD minimálisan változik (9. ábra).

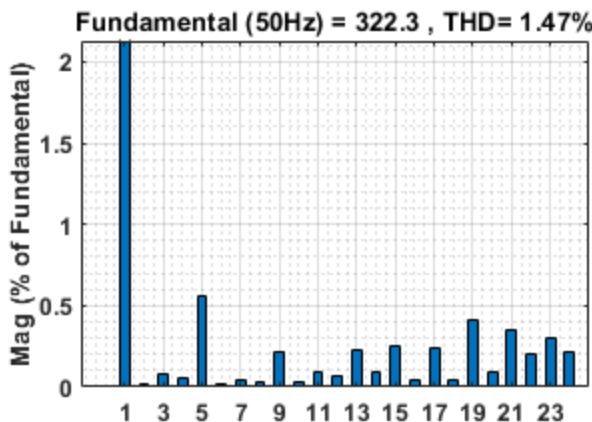
9. ábra: THD a terhelés függvényében.



Forrás a szimulációs eredmények alapján a szerző szerkesztése.

Ellenőrizni kell, hogy az inverter megfelel-e az EN 50160 szabvány THD-re vonatkozó követelményeinek. A relatív feszültségek nem haladhatják meg a szabványban szereplő táblázatban leírt értékeket, mint ami a 3. ábrán látható. A legmagasabb THD érték esetén, amely 1,47%, az FFT (gyors Fourier-transzformáció) eredménye a 10. ábrán látható. Az egyes harmonikus rendszámok nem érik el a szabványban meghatározott maximumot.

10. ábra: Egyfázisú inverter feszültség FFT-je.



Forrás: a szimulációs eredmények alapján a szerző szerkesztése.

6. Következtetések, összegzés, záró gondolatok

Összességében elmondható, hogy a szimulációs eredmények alapján a szigetüzemű inverterrel ellátott szünetmentes aszinkron motorhajtás megfelelően működik. Mind az aszinkron motort, mind az egyfázisú fogyasztót káros tranziensek nélkül látja el. A napelem és az MPPT szabályozó nem szerepelt ebben a tanulmányban, mivel nem

befolyásolja a rendszer működését. A napelem egy opcionális rendszerelem, a szünetmentes áramkör hasonlóan működik nélküle is. A napelem telepítése azonban erősen ajánlott, mert a terhelések akár tisztán napelemről is táplálhatók és az akkumulátornak nagyobb üzemideje lesz. A rendszerben lévő fogyasztók maximális teljesítménye megegyezik az LLC konverter kimeneti teljesítményével, amennyiben tisztán napelemről tápláljuk a DC kört. Ez a rendszer főbb korlátozó paramétere. Az LLC konverterek azonban párhuzamosan csatlakoztathatók az univerzális DC sínre. A tanulmány azért említette az LLC átalakítót, mert a lágy kapcsolat miatt nagy hatásfokú rendszer érhető el vele (Escudero et al., 2021). Nagyobb teljesítménynél flyback konverter vagy bármilyen boost konverter is használható. A rendszer másik előnye, hogy a THD 3% alatt van, így minden országban használható, mert megfelel a szabvány követelményeinek.

Ez a tanulmány csak elméleti eredményeket közölt, nincsenek valós mérési eredmények. Jelenleg azonban a kutatás olyannyira előrehaladt, hogy a bemutatott szünetmentes rendszert megvalósult, és a mérések dokumentálása megtörtént. A későbbiekben a szimulációból kapott értékeket és a mért értékeket összehasonlítjuk, és egy új kéziratban fogjuk közzétenni. Az eddigi mért eredmények nagymértékben tükrözik a szimulációk során kapott eredményeket. A mért értékek közül például: THD = 1,2% az egyfázisú inverter kimenetén. Korábbi mérési eredmények a 4. irodalomban találhatóak, ahol a rendszerben nincs egyfázisú inverter.

Köszönetnyilvánítás

„A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.”

Irodalomjegyzék

- Boros, R. R., Bodnár, I. (2022): Grid and PV Fed Uninterruptible Induction Motor Drive Implementation and Measurements. *Energies*, 15 (3): 708. <https://doi.org/10.3390/en15030708>
- Escudero, M., Kutschak, M.-A., Pulsinelli, F., Rodrigue, N., Morales, D. P. (2021): On the Practical Evaluation of the Switching Loss in the Secondary Side Rectifiers of LLC Converters. *Energies*, 14 (18): 5915. <https://doi.org/10.3390/en14185915>
- Hannan, M. A., Ali, J. A., Mohamed, A., Hussain, A. (2018): Optimization techniques to enhance the performance of induction motor drives: A review. *IEEE Access*, 81: 1611–1626. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.240>
- Jiao, N., Wang, S., Liu, T., Wang, Y., Chen, Z. (2019): Harmonic Quantitative Analysis for Dead-Time Effects in SPWM Inverters. *IEEE Access*, 7: 43143–43152. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2907176>
- Junling, C., Xinjian, J., Dongqi, Z., Haigang, W. (2010): A novel uninterruptible power supply using flywheel energy storage unit. *The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 3: 1180–1184.
- MSZ EN 50160:2010/A3:2020 A közcélú elosztóhálózatokon szolgáltatott villamos energia feszültségjellemzői.
- Tan, R., Chuin, C., Solanki, S. (2020): Modeling of single phase off-grid inverter for small standalone system applications. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 11 (3): 1398–1405. <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i3.pp1398-1405>

Wattler Á. (2023): Napelemtelepítés új szabályai (viszwattos vagy hálózatra termelő, nem-HMKE).
<<https://wattler.eu/2022/08/napelem-szabalyok/>> (2023.02.23.)