

Pályázat
Energiahatékony Vállalat díjra

**Villamos energia visszatáplálás a BKV Zrt. Metró Észak-Déli
(M3-as) vonalának áramellátási rendszerébe**

Zentai László projekt mérnök

Buday Ágota műszaki titkár

Összefoglalás

2025.

Tartalomjegyzék

I.	Előzmény	3
II.	Bevezetés	3
1.	Az M3 metróvonal áramellátási rendszere.....	3
2.	Energiafelhasználás	3
3.	A vontatási villamosenergia-felhasználás környezeti hatásai	4
4.	Energiamegtakarítási lehetőségek a metró villamos fogyasztó berendezéseiben	4
III.	Energiamegtakarítás az M3 metró vontatási hálózatában	5
1.	A vontatási hálózat paraméterei.....	5
2.	A villamosenergia-visszatáplálás műszaki megoldása	5
3.	Szükséges módosítások a vontatási hálózaton.....	8
4.	Járulékos fejlesztés	9
5.	Az alkalmazott metrójármű villamos paraméterei	9
6.	Az elért megtakarítás mértéke.....	9

I. Előzmény

A BKV Zrt. 2016-ban már sikeresen pályázott az M2-es metróvonalon végzett rekonstrukció során megvalósított visszatáplálás eredményeként elért megtakarítással. A 2013-14. során zajlott rekonstrukció egyik fontos eleme volt a járművek fékezési energiájának hasznosítása a vontatási rendszerbe történő visszatáplálással. Tekintettel arra, hogy az új Alstom járművek már képesek voltak a visszatáplálásra, az infrastruktúra rendszerelemek kiépítésével, valamint egy optimális menetrend kialakításával jelentős energiamegtakarítást sikerült realizálni. Ennek eredményeképpen a BKV Zrt. 2016-ban 518,4 kWe megtakarítással járult hozzá a Virtuális Erőmű építéséhez.

II. Bevezetés

1. Az M3 metróvonal áramellátási rendszere

A budapesti M3 Észak-Déli metróvonal áramellátási rendszere – hasonlóan a többi, már üzemelő M2 és M4 metróvonalhoz – 10 kV-os közép feszültségen vételezi a szerződött áramszolgáltatótól a villamos energiát.

Miután a metróvonalak működtetéséhez kizárólag villamos energiára van szükség, annak felhasználása – különös tekintettel a veszteségek csökkentésére és az energiatakarékos megoldások következetes és egyre nagyobb mértékű alkalmazására – fokozott figyelmet követel.

Az M3-as metróvonal áramellátási rendszere közép feszültségű szinten villamosenergia-fogadó állomásokból, villamosenergia-elosztó és kapcsoló berendezésekből, segédüzemi transzformátorokból és vontatási blokkokból, kisfeszültségű szinten 0,4 kV-os elosztó- és kapcsolóberendezésekből és azok fogyasztóiból, valamint 0,8 kV egyenáramú szinten a vontatási energia elosztására és kapcsolására szolgáló berendezésekből, valamint a járművekből, mint fogyasztókból tevődik össze. A rendszer biztonságos és hatékony működtetését az alkalmazott redundáns áramköri elemek (pl. kábelhálózat, többszörözött kapcsolóberendezések, szünetmentes áramforrások, automatikák, vezérlő berendezések stb.) biztosítják.

2. Energiafelhasználás

Ezen elosztó- és kapcsolórendszerek, köszönhetően a korszerű technológia elterjedt alkalmazásának, alacsony veszteséggel képesek a fogyasztói energia továbbítására.

A segédüzemi (erőátviteli, világítási, vezérlő berendezések) villamosenergia-felhasználás 2015-ben az összes felhasznált villamosenergia 30,44%-a volt. Azóta ezen fogyasztói berendezések energiahatékonyságának növelése az elmúlt időszakban jelentős mértékben realizálódott. LED-es technológiák alkalmazása a teljes világítási hálózaton, frekvenciaváltós szabályozók a gépészeti berendezésekben, mozgólépcsőknél jelentős energiamegtakarítást eredményeztek.

Ugyanakkor a rendszerbe kötelezően beépítendő eszközök (pl. vízköddel oltók, ferdelifteket, biztonsági berendezések) némileg megnövelték a segédüzemi energiaszükségletet. A 2024. II. félévi adatok alapján a segédüzemi energiafelhasználás a teljes fogyasztás 33,4%-a.

Más a helyzet a vontatásienergia-ellátás területén.

Az M3 vonalon 2018 április 2-ig közlekedő metrójárművek „hagyományos” egyenáramú soros gerjesztésű, mezőgyengítéses elven működő hajtómotorokkal voltak ellátva, a fékezés során egyrészt mechanikus, másrészt villamos ellenállásfékezés volt használatban.

A vontatásienergia-felhasználás az M3-as metró vonatkozásában 2015-ben a teljes villamosenergia-felhasználás 69,56%-át tette ki.

3. A vontatási villamosenergia-felhasználás környezeti hatásai

A villamos ellenállásfékezés hatásai között jelentkezett a megnövekedett alagúti hőmérséklet, hiszen a járművek mozgási energiája generátorüzemben a fékezőellenállásokon hővé alakulva (disszipáció) melegítette az alagutat és környezetét. Az ily módon átalakuló energia – hasznosítás nélkül – csak a veszteségeket növelte.

4. Energiamegtakarítási lehetőségek a metró villamos fogyasztó berendezéseiben

A fogyasztásban jelentkező mennyiségi különbségek, illetve a segédüzemi- és a vontatási berendezések technikai színvonala közötti jelentős különbségek rávilágítanak az utóbbi területen elérhető, számottevő energiamegtakarítási lehetőségekre.

Míg a segédüzemi berendezések energiafogyasztását a már említett korszerű, kisfogyasztású, egyre növekvő hatásfokkal bíró eszközök csökkentették, addig a műszaki fejlesztés során, illetve a hatósági előírások követelményei szerint beépített – főleg biztonsági – berendezések jelentős száma miatt az energiafogyasztás szignifikáns növekedést mutat.

A segédüzemi berendezések területén további jelentős energiamegtakarítás jelenleg csak takarékos üzemeltetéssel érhető el.

Az M3 metróvonal vontatási hálózatán az infrastruktúra- és járműrekonstrukciót megelőző időszakban (1986-1990) említésre méltó energiamegtakarítást csak a vasútbiztosító berendezésre „ráépülő” AVR rendszer (Automatikus Vonatvezető Rendszer) produkált, mely vonalszinten összességében mintegy 16,9%-os csökkenést eredményezett.

Az egyenáramú vontatási hálózaton – a jelenlegi műszaki állapotokat figyelembevéve – számottevő energiamegtakarítást csak a visszatáplálásos fékezési üzemmód megvalósításával lehet elérni.

III. Energiamegtakarítás az M3 metró vontatási hálózatában

1. A vontatási hálózat paraméterei

A vontatási hálózat paraméterei a rekonstrukciót megelőzően:

Vontatási áramátalakítók száma:	13 db
Vontatási transzformátorok száma:	41 db
Vontatási transzformátorok típusa:	TGEJ, NALÖ, NALÖT, Yy0/Dy11
A vontatási hálózat névleges feszültsége:	750 VDC +20, -30%,
A 825VDC gyűjtősin üresjárási feszültsége:	825 VDC,
Megengedett maximális hálózati feszültség:	900 VDC,
Vontatási egyenirányítók száma:	1+13+27= 41 db
Vontatási egyenirányítók típusa:	KV-1800/825 Si, SKV-1800/825, DBN 30100 S1/8
2015. évi 8-12. havi vontatásienergia-fogyasztás:	26 220 820 kWh

A vontatási hálózat paraméterei a rekonstrukciót követően:

Vontatási áramátalakítók száma:	13 db
Vontatási transzformátorok száma:	39 db
Vontatási transzformátorok típusa:	Siemens 4GJ6343-1DQ Geafol
A vontatási hálózat névleges feszültsége:	750 VDC +20, -30%,
A 825VDC gyűjtősin üresjárási feszültsége:	825 VDC,
Megengedett maximális hálózati feszültség:	900 VDC,
Vontatási egyenirányítók száma:	39 db
Vontatási egyenirányítók típusa:	Siemens Sitras REC MG01
2024. évi 8-12. havi vontatásienergia-fogyasztás:	16 335 677 kWh

2. A villamosenergia-visszatáplálás műszaki megoldása

Általánosságban a járművek fékezése során keletkező energia hasznosulása is többféle lehet, úgymint a tárolt energia felhasználása közvetlenül a járművek indulásakor, a hálózatba visszatáplált energia hasznosulása a tápkörzetben éppen induló járművek révén, illetve a tárolt energia hasznosulása a tápkörzetbe beérkező vontató jármű által. Utolsóként lehet említeni a „nem vontatási” hálózatba történő visszatáplálást, ekkor a tápkörzetekben nem tartózkodik terhelés (jármű), így a keletkező villamos energiát áramirányítók felhasználásával vagy a jelenlévő kommunális jellegű, vagy a középvezettségű váltakozó áramú szolgáltatói hálózatba továbbítjuk.

A budapesti M3 metró rendszerében a visszatáplált energiát maga a rekuperáló szerelvény segédüzemi berendezései, illetve a tápkörzetben tartózkodó, éppen induló szerelvény tudja hasznosítani.

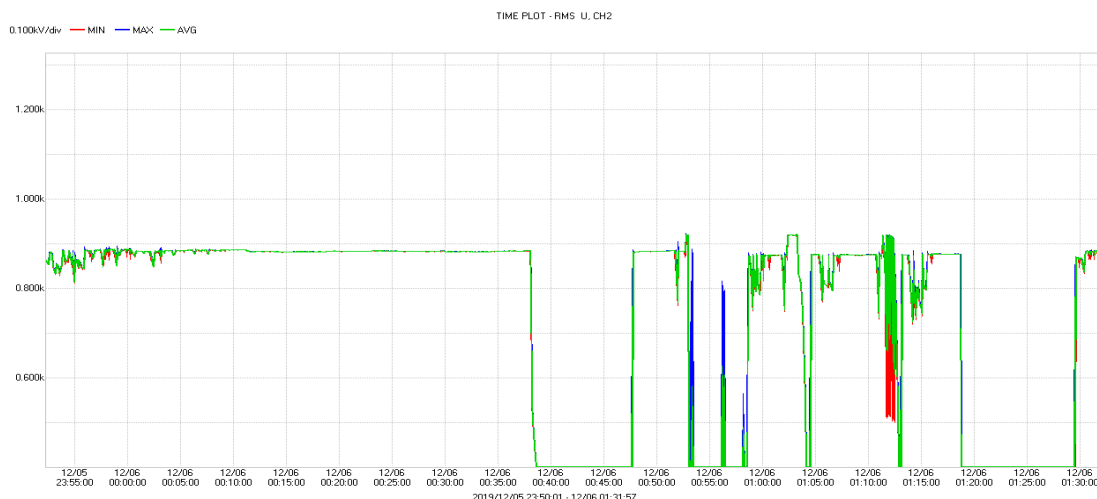
Az energia visszatáplálás, vagyis a rekuperáció azon túl, hogy növeli az energiahatékonytságot, nagymértékben csökkenti a „hulladékhő” által okozott kedvezőtlen hatásokat is, mely különösen a metróközlekedés zárt környezetében fontos.

A keletkező villamos veszteségek hatásai az alábbiakban foglalhatók össze:

- meddő energia keletkezik mágneses terek formájában,
- csökken a vezetékeken átvihető maximális teljesítmény, hő keletkezik,
- a keletkező hő csökkenti a környezetben lévő minden berendezés élettartamát,
- csökken a szigetelőképesség, növekszik a tűzveszély.

A villamosenergia-megtakarítást több hálózati összetevő határozza meg. Ezek közül a járműparamétereket adottságnak tekintjük. Szintén adottságnak tekinthető az infrastruktúra létrehozása során kialakított áramellátási rendszer, hiszen a kapcsolási kép változtatása csak bizonyos korlátok között lehetséges.

A rekuperáció során az induló jármű jellemzően a felső határértékkel korlátozott, a fékező jármű által generált táppontból fogja vételezni az energiát. Az ábrán látható, hogy a jármű feszültsége a fékezés fázisában eléri a 900 VDC értéket, a vontatási fázisban pedig a soros impedanciák által meghatározott feszültségesés látható. A budapesti metrónál a rekuperáló feszültség 75 VDC-vel haladja meg a névleges 825 VDC értéket.

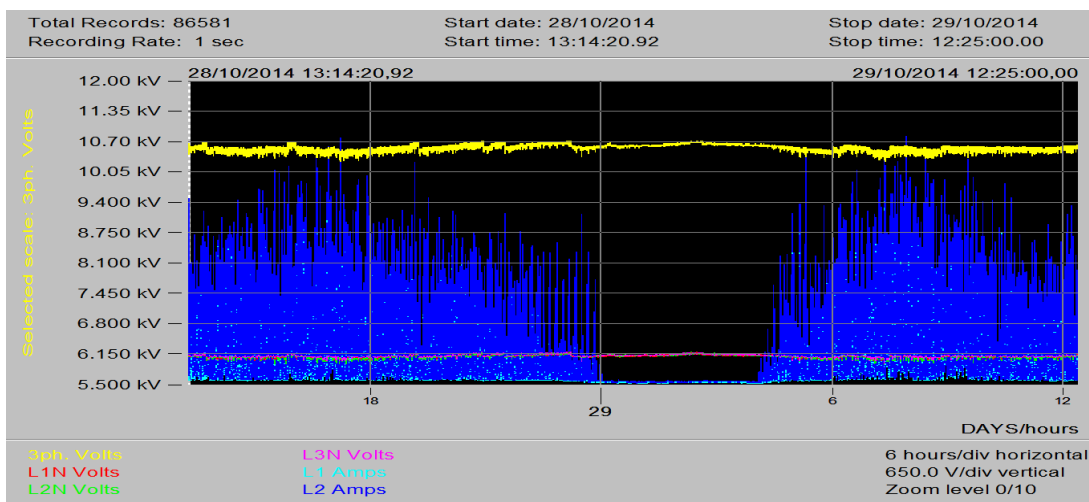


1. ábra A rekuperáció elvi lehetősége

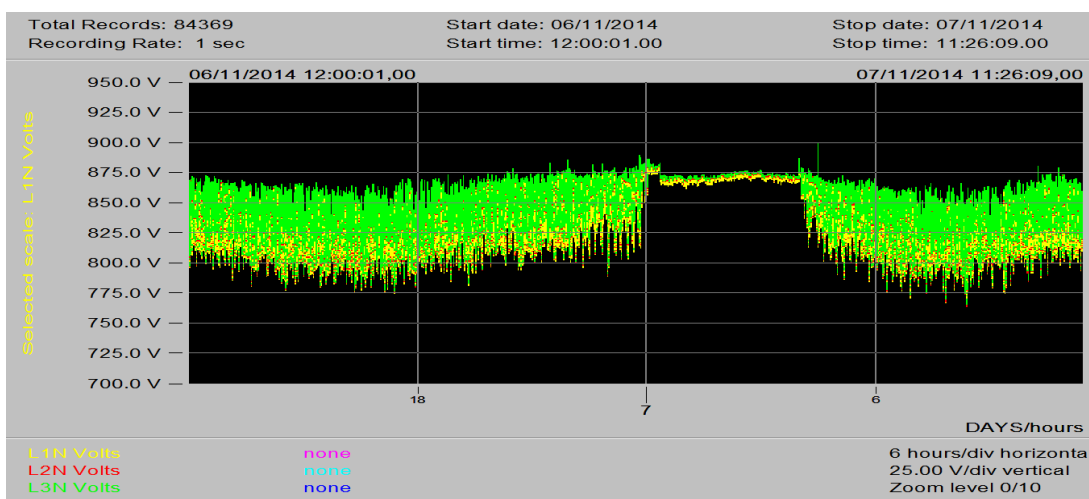
A metró hálózatában a két lehetséges áramforrás vagy egy éppen visszatápláló jármű, vagy az egyenáramú vontatási hálózat egyenirányítói. A jármű az energiát abból az „áramforrásból” fogja vételezni, amelyiknek nagyobb a feszültsége, azonos kapocsfeszültség esetén pedig abból, amelyiknek kisebb a belső ellenállása. Ez az esetek egy részében – az igen magas, 900 V-os visszatápláló feszültség miatt – az éppen fékező vonatot jelenti. A hatékonyság növelése érdekében olyan optimalizált vonatkövetési rendszert (menetrendet) kell alkalmazni, hogy mindig legyen olyan szerelvény a vonalon, amely az éppen visszatápláló jármű által termelt energiát fel tudja venni. Ez menetrendfüggő, áramellátási szempontból nem lehet befolyásolni.

A vontatási feszültség értékét befolyásolja a különböző 120/10 kV-os ELMŰ alállomások pillanatnyi feszültségértéke is. Ezen értékek közötti különbség kiegyenlítő áramokat indukál a vontatási hálózaton, ezért kívánatos a vontatási transzformátorok áttételének változtatásával a feszültségkülönbségek megszüntetése. Másik fontos feltétel a visszatápláló és a hálózati feszültség közötti különbség optimalizálása a jó

rekuperációs hatások elérése érdekében. Ez szintén a vontatási transzformátorok áttételének „hangolásával” érhető el.



2. ábra ELMŰ feszültségek mért értékei különböző középvezetőségű betáplálásokon



3. ábra vontatási feszültségek mért értékei HAT (Határ út) állomáson

Az áram-visszatáplálás hatásfoka e fenti tényezőkön kívül nagymértékben függ a táphálózat impedanciájától, tehát fontos célként ezen impedancia csökkentését lehet megjelölni. További jelentősebb impedanciát képeznek a hálózatban a vontatási kábelek, melyek zöme 800 mm² keresztmetszetű Al kábel, valamint az áramvezető úgynevezett harmadik sínek.

A harmadik sínek impedanciája ötvözéssel befolyásolható, itt nagyobb széntartalmú ötvözetek használata célszerű. A kábelek impedanciájának csökkentése keresztmetszet-növeléssel realizálható, azonban ez a módszer kevésbé költséghatékony. Reális műszaki megoldás kínálkozik a visszatáplálási hurkok hosszának csökkentésével, ami a meglévő táppontok hosszának felezésében nyilvánul meg, a visszatápláló áramnak feleakkora távolságot kell megtennie, így a veszteség is felére csökkenthető.

3. Szükséges módosítások a vontatási hálózaton

Ahhoz, hogy a vontatási hálózatba visszatáplált villamos energia optimálisan legyen felhasználható, bizonyos átalakítások, módosítások elvégzése szükséges.

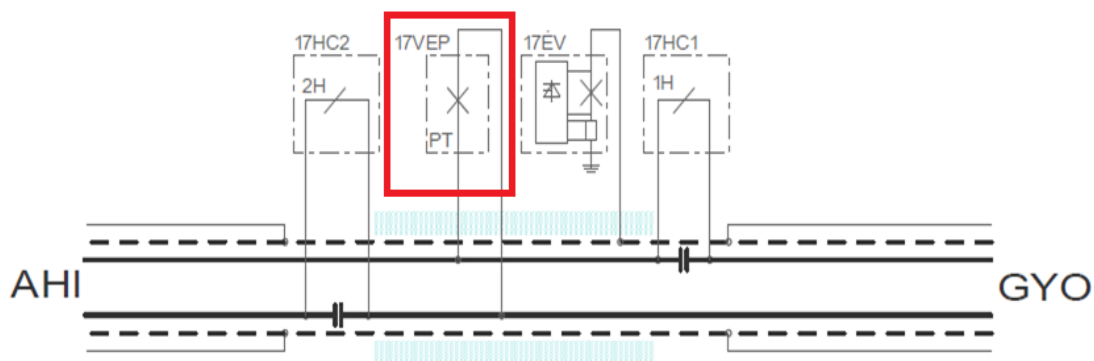
A rekuperáció esetében a hálózatot nemcsak a vontatási blokkok táplálják, hanem a fékezéskor generátorüzemben működő jármű hajtómotorok is, így a mindenkori terhelés a hálózati impedanciák, valamint a belső ellenállások arányában vételezi az áramforrásokból a villamos energiát.

Annak érdekében, hogy a járművek által termelt energia maradéktalanul visszajusson a hálózatba, a vontatási transzformátorok megcsapolásainak összehangolt beállításával létre kell hozni a

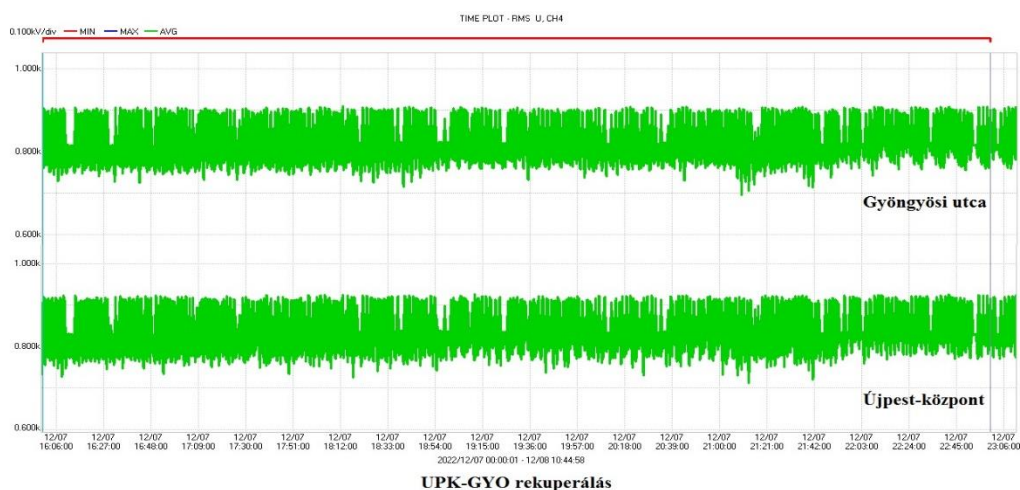
$$dU \sim 75 \text{ VDC}$$

feszültségkülönbséget a hálózati és a rekuperációs feszültség között, egyben meg kell akadályozni a vontatási áramátalakítók közötti kiegyenlítőáramok kialakulását is.

Emellett lehetőség szerint csökkenteni kell a visszatápláló áram által okozott veszteségeket, ezért a megfelelő tápkörzetek hurokellenállásának csökkentése érdekében a segédüzemi, illetve delegált állomásokra egy ún. PT megszakítót kell beépíteni.



4. ábra A hurokellenállás csökkentése ún. „PT” megszakító beépítésével



5. ábra Rekuperálás az UPK-GYO (Újpest-központ-Gyöngyösi utca) tápkörzetben

4. Járulékos fejlesztés

A balesetek elkerülése érdekében meg kell akadályozni, hogy a rekuperációs feszültség, mely az állomásperonok alatt húzódó 3. sínen jelen van, áramütést okozzon, ezért a peron alatti burkolt 3. síneket járulékos szigeteléssel kell ellátni, mely beesés esetén a véletlen érintés valószínűségét csökkenti.

5. Az alkalmazott metrójármű villamos paraméterei

A jármű paraméterei a rekonstrukciót megelőzően:

Mivel a régebbi Ev3, 81-717/714 típusú járművek rekuperációs képességekkel nem rendelkeztek, így azok paramétereit itt nem soroljuk fel.

A 81-717.K2/714.K2 típusú jármű paraméterei a felújítást követően:

A vontatási rendszer névleges feszültsége:	825 V
A vontatómotorok rendszere:	háromfázisú, kalickás forgórészű aszinkron, négy pólusú motor
A vontatómotorok típusa:	HS35531-03RB
A vontatómotorok kapocsfeszültsége:	530 V
A vontatómotorok névleges árama:	306 A (max)
A hajtásszabályozó inverter típusa:	VFI-HD1415V
A hajtásszabályozó inverter névleges feszültsége (Be/kimenet):	825 V / 530 V
A rekuperáló feszültség max. értéke:	905 V
A rekuperáló áram max. értéke:	nincs adat

6. Az elért megtakarítás mértéke

A villamosenergia-megtakarítás mértékének meghatározásához ki kell választani az összehasonlításra alkalmas időintervallumokat, melyek a következők:

A teljes vonali rekuperáció 2024. július 17-én indult, ezért a vizsgált időszak:

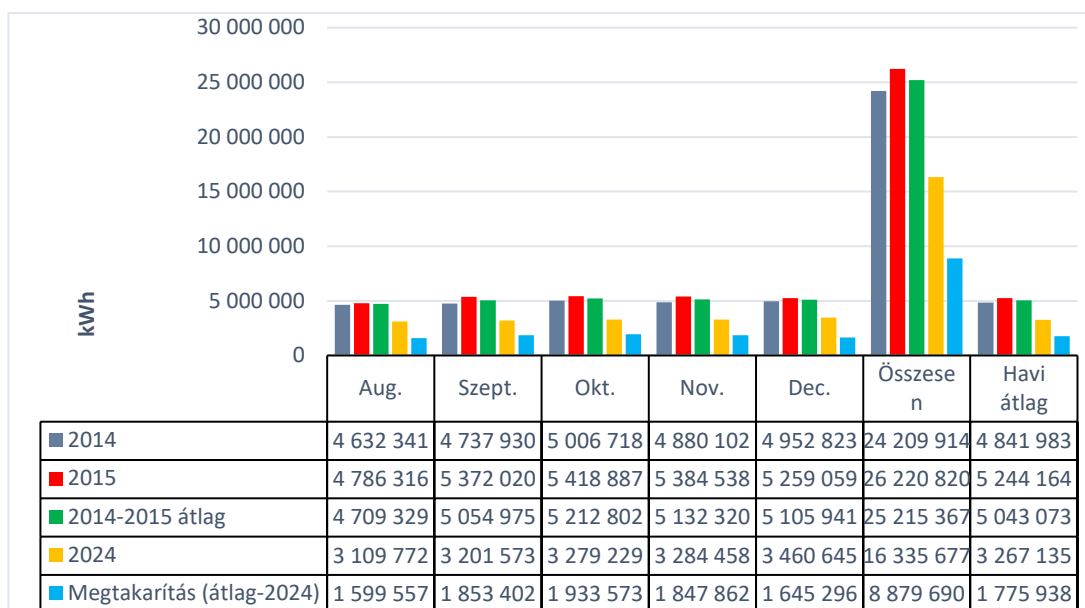
2024. augusztus 01.–2024. december 31.

Rekuperáció nélküli üzemmóddal működő referenciaként használható, értékelhető időszak:

2014. augusztus 01.–december 31. és 2015. augusztus 01.–december 31. közötti időszakok átlaga.

A rekonstrukció során mind a vontatási villamosenergia-fogyasztásban, mind a segédüzemi villamosenergia-fogyasztásban keletkezett villamosenergia-megtakarítás. A segédüzemi rész rekonstrukciója során azonban olyan berendezések is beszerelésre kerültek, amelyek többlet villamosenergia-fogyasztást eredményeztek, ezért tisztán csak a vontatási villamosenergia-megtakarítás mutatható be.

Az egyes rendszerelemek műszaki tulajdonságai (az infrastruktúra, a jármű és a menetrend) összességében meghatározzák az energiahatékonyság mértékét.



6. ábra M3 metróvonal vontatási fogyasztása 2014-2015, 2024

A fenti paramétereket összesítve látható, hogy a teljes megtakarítás mértéke (8 879 690 kWh) – az előző években közlekedtetett orosz szerelvények átlagolt fogyasztási adatait (25 215 367 kWh) bázisnak tekintve – 35,21%.

A projekt hozzájárulása a virtuális erőmű programhoz:

Az energiahatékonyág bemutatására az M3 metróvonal rekonstrukciója előtti két év azonos időszakainak átlagát és a rekonstrukció utáni, próbaüzemeltetések nélküli 2024.08.01. és 2024.12.31. közötti időszakot vesszük figyelembe – nagyságrendileg azonos menetrend és futásteljesítmény mellett.

2014. 08-12. havi vontatási villamosenergia-fogyasztás: 24 209 914 kWh

2015. 08-12. havi vontatási villamosenergia-fogyasztás: 26 220 820 kWh

Az M3 metróvonal rekonstrukció előtti átlagos vontatási villamosenergia-fogyasztása a jelzett időszakokra: 25 215 367 kWh.

Az M3 metróvonal rekonstrukció utáni – 2024. 08-12. havi – vontatási villamosenergia-fogyasztása: 16 335 677 kWh.

Fentiek alapján a felújítás eredményeként 8879,69 MWh villamosenergia-megtakarítást sikerült elérni.

A VEP szempontjából elfogadható villamos teljesítménycsökkenés:

$$\text{PVEP} = \text{QVE} \times \eta / \tau_{\text{CS}} = 8879,69 \text{ MWh} \times 60\% / 6000 \text{ h} = \mathbf{887,96 \text{ kW}}$$

ahol:

PVEP – a VEP szempontjából értékelt villamos teljesítménycsökkenés,

QVE – a teljesítményszámítás alapját képező energiamegtakarítás,

η – átlagos erőműi hatásfok

τ_{CS} – erőműi éves csúcsidei üzemóraszám

Összegezve a fentebb leírtakat:

$$\text{PVEP} = 8.879.690 \text{ kWh} \times 0,6 / 6000 = 887,96 \text{ kWe}$$

Villamos energia visszatáplálás a BKV Zrt. M3 metróvonalának áramellátási rendszerébe a projekt 887,96 kW értékkel járult hozzá a Virtuális Erőmű építéséhez.