

A Simplon alagút vasútvonal villamosítása Kandó Kálmán háromfázisú rendszerével

Dr. Jeszenszky Sándor

Dr. Jeszenszky Sándor Ernő, nyugdíjas, Orlay u.4. 1114 Budapest, Magyarország,
jeszi@qwertynet.hu

Absztrakt: A Simplon vasúti alagút, amely Olaszországot Svájjal köti össze, 1906-ban nyílt meg. 70 évig ez volt a világ leghosszabb vasúti alagútja. A cikk bemutatja az olaszországi Valtellina vonal villamosítását háromfázisú rendszerrel, amelynek tervezője Kandó Kálmán, kivitelezője a budapesti Ganz gyár volt. Ennek sikere alapján határozták el a Simplon vasútvonal Kandó rendszerű villamosítását. Az első mozdonyt a Valtellina vonaltól vették kölcsön, de a svájci BBC hamarosan megépítette saját mozdonyait. Néhány megoldása különbözött a Kandó mozdonyokétól, de alapelvük ugyanaz volt. Kettős felsővezeték, a mozdonyban elhelyezett háromfázisú motorok és rudazat hajtású kerekek, Kandó háromszöggel.

Kulcsszavak: Háromfázisú mozdony, kettős felsővezeték, aszinkron kaszkád, vízindító, rudazat hajtás, Kandó-háromszög

1. Bevezetés, áttekintés

Kandó Kálmán munkásságát leginkább villamos mozdonyaihoz kapcsolják. Ennél ő sokkal többet tett, ő honosította meg a háromfázisú rendszert Magyarországon.



1. ábra:

A dupla Simplon alagút bejárata, 3 fázisú, kettős felsővezetékkel

A váltakozóáram már az első elektromágneses áramfejlesztő, Pixii 1832-es állandó mágneses generátora óta ismert volt, de a galvánelemek korában gyakorlati célokra alkalmatlannak tartották. Minden villamos készülék, csengő, távíró és telefon, villanymotor, akkumulátor, galvanizáló berendezés egyenárammal működött. Pixii gépét Ampère tanácsára egyenirányító érintkezőkkel (kommutátorral) látta el.

Az áramellátás legnagyobb tekintélye Edison volt, aki mereven kitartott az egyenáram mellett, a nagy városok villamosítása az 1880-as években egyenárammal történt.

A váltakozóáram úttörője a Ganz gyár és mérnök-hármasa, Zipernowsky, Déri és Bláthy volt, találmányuk a zárt vasmagú transzformátor és a nagyfeszültségű, a felhasználóknál párhuzamosan kapcsolt feszültségcsökkentő transzformátorokkal történő áramelosztás tette lehetővé a villamosenergia nagy távolságú szállítását. Rendszerük egyfázisú volt, ami kielégítette az izzólámpás és ívlámpás világítási igényeket. 1885-ben mutatták be a budapesti Országos Iparkiállításon. A kiállítás világítása megfelelt egy korabeli kisvárosénak. 1886-ban a Ganz egyfázisú váltakozóárammal építette meg Róma villamos hálózatát, 1892-ben pedig a világ első, állandó üzemű távvezetékét a Római Hőerőmű és a Tivoli Vízerőmű között, szinkron üzemmódban. Az elosztás 2000 V-os táphálózattal, 2000/100 V-os transzformátorokkal történt. Az 1.440 kW-os erőmű a világ élvonalába tartozott. A következő 10 évben a Ganz világszerte több, mint 160 áramfejlesztő telepet épített. Megkezdődött ez egyenáram és a váltakozóáram harca.

Az egyenáram és a váltakozóáram harcában az egyenáram fő előnye az addigra már magas szintre fejlesztett egyenáramú motor, hátránya a nagyon gazdaságtalan energia továbbítás volt. Egy áramfejlesztő telep csupán pár száz méteres körzetet

tudott ellátni, ami a nagyvárosokban komoly környezetszennyezési bajokat okozott. Az egyfázisú váltakozóáram előnye a gazdaságos energia átvitel volt, de hiányzott a megfelelő motor.



2. ábra:

Tesla tárcsa motor másolata a Deutsches Museumban

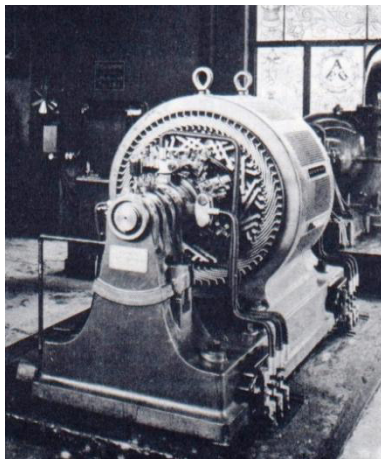
Nikola Tesla 1882-ben Budapesten jutott el a többfázisú energiaátvitel gondolatáig, kommutátor nélküli indukciós motorral. Elgondolását azonban nem hozta nyilvánosságra. Az Egyesült Államokba utazott, ahol Edison munkatársa lett, aki közismerten váltakozóáram ellenes volt. Kivált Edison cégéből, és önálló kutatóként találmányát 1887-ben szabadalmaztatta. Később Westinghousenek, a váltakozóáram amerikai úttörőjének adta át a gyártás jogát.

Tőle függetlenül Galileo Ferraris 1885-ben kétfázisú motort mutatott be, de csak 1888-ban publikálta. Az indukciós motor hatásfokát Ferraris tévesen csupán 50%-ra becsülte, ezért továbbfejlesztésével nem foglalkozott.



3. ábra Kétfázisú Ferraris motor másolata a Deutsches Museum-ban

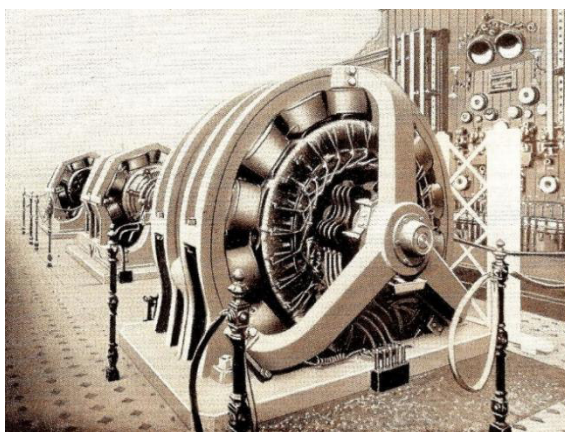
Az elv megvolt, de gyakorlati megvalósítására az 1891-es Frankfurter Nemzetközi Elektrotechnikai kiállításon került sor. A motor konstrukció Michael Dolivo-Dobrowolskyhoz, az AEG mérnökéhez fűződik. Az AEG és a svájci Oerlikon, a későbbi BBC 175 km hosszú 15kV-os háromfázisú távvezetékkel hozta az energiát a Lauffeni Vízerőműtől a kiállításon levő 100 LE-s aszinkron motorhoz. Ott mesterséges vízesést működtetett, a közbeszéd szerint 3 szál vezetéken elhozták a lauffeni vízesést Frankfurtba. A kiállítás után azonban a távvezetékét lebontották.



4. ábra: Frankfurt, 1891, 100 LE-s aszinkron motor

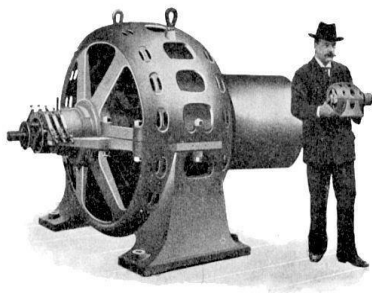
1893-ban, Budapest közcélú áramszolgáltatása kezdetén a főváros villamosítása a már általánosan alkalmazott egyenáram és az új váltakozóáramú rendszer összehasonlításának nagy léptékű kísérlete lett.

A Ganz egyfázisú rendszert épített, ennél nem volt probléma, hogy erőművet már nem lehetett a belvárosban építeni. Elosztó hálózatának feszültsége 3000 V volt. De ugyanez a követelmény vonatkozott az egyenáramú rendszerre is. Ott a megoldás az volt, hogy nagyfeszültségű váltakozóárammal jutott az energia a motor-generátoros egyenirányító alállomásokba. Ez azonban már kétfázisú, 1800V-os 26 Hz-es rendszer volt, az alállomásokon aszinkron motorokkal. Az első alállomás a Kazinczy utcában volt. Bár az egyenáram már kezdett avulttá válni, az erőmű és az egyenirányító állomás közötti kapcsolat korszerűbb volt, mint az egyfázisú, transzformátoros Ganz rendszeré. A Schuckert cég építette.



5. ábra: Kétfázisú aszinkron motorral hajtott dinamók a Kazinczy alállomáson

A transzformátor és a transzformátoros nagyfeszültségű áramelosztás feltalálói mégis idegenkedtek az új innovációtól, a többfázisú váltakozóáramú rendszertől. A Ganz vezérigazgatója, Mechwart András ezért hazahívta párizsi Fives-Lille cégnél háromfázisú motorokat tervező 25 éves Kandó Kálmánt, aki 1895-ben megtervezte az első F motorsorozatot, és megkezdődött a gyártás. Az „F” forgóáramot jelentett, a német Drehstrom fordítását. Ma már inkább az aszinkron elnevezést használjuk, hiszen nem az áram, hanem a gép mágnes mezeje forog. A motorok 15 típusnagyságban készültek, 1 – 100 LE teljesítmények között, rövidrezárt vagy csúszógyűrűs forgórészszel.



6. ábra: Kandó motorok

Az eredmények Kandó figyelmét a nagyvasúti villamosításra irányították. Megállapította, hogy ez alapvetően eltér a városi villamosoktól, és gazdaságosan csak nagyfeszültségű táplálással, aszinkron motorokkal üzemeltethető,



7. ábra: Kandó aszinkron motoros kísérleti kocsija

Ehhez járul, hogy lejtmenetben az aszinkron motorok külső beavatkozás nélkül generátoros féküzemben működnek. A kísérleteket már 1896-ban megkezdte.

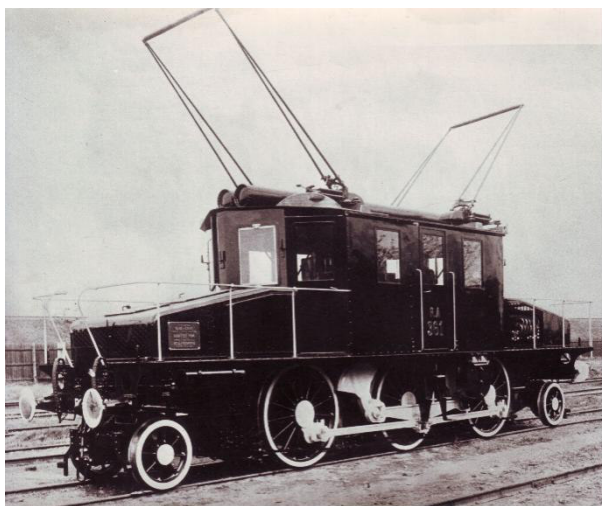
Ezek alapján vállalkozott 1899-ben Kandó, illetve a Ganz a Comói tó melletti, 106 km-es, alagutakkal, emelkedőkkel teli Valtellina vasút villamosítására. Ez volt az első „igazi” nagyvasút villamosítás. 1902-ben megindult az üzem. A vontatás a kis teherforgalmú, elsősorban idegenforgalmi célokat szolgáló vonalon RA 34 sorozatú, egy sebességű tehervonati mozdonyokkal (29 km/óra) és a személyszállítás motorkocsikkal történt, két sebesség fokozattal, aszinkron kaszkád illetve közvetlen táplálású motorokkal. (32 és 64 km/óra). A kaszkád hajtás akkoriban újdonságnak számított. A motorok közvetlenül hajtották a

kerekeket, közös, de a motorok rugózott felfüggesztését lehetővé tevő csuklós tengelyekkel. A távvezeték feszültsége 22 kV, frekvenciája 15 Hz volt, a felsővezetékét transzformátorral 3000V-tal táplálták. Az energiát a Morbegnói vízerőmű szolgáltatta.



8. ábra: RA 34-es mozdony a milánói Leonardo da Vinci múzeumban, már nem az eredeti, hanem BBC áramszedőkkel felszerelve

1904-ben a Ganz igényesebb, RA 36 sorozatú, 2 sebességű (31 és 62 km/h) mozdonyokat szállított, ezeken már megvolt a háromfázisú Kandó mozdonyok minden jellegzetes megoldása. Ismeret a teljes siker. Mégis, mivel a Hitelbank a Ganz mozdonyépítést banki szempontok miatt nem támogatta, a Ganzban a mozdony gyártás megszűnt. Olaszországban, Vado de Liguréban épült mozdonygyár, Kandó Kálmán vezetésével. Több, mint 700 további típusú, de azonos rendszerű Kandó mozdonyt gyártottak, 1700 km-t villamosítottak háromfázisú Kandó rendszerrel. Az olaszok büszkén Systema Italianának nevezték.



9. ábra

A Valtellina vonal RA 363-as mozdonya, eredeti áramszedőkkel

Az azonban kevésbé ismert, hogy Svájcban a Gothard alagút forgalma a Valtellinától kölcsönként 363-as mozdonnyal indult 1906-ban, majd a svájci BBC gyártott részleteiben eltérő, 364 és 365 számjelű, de Kandó rendszerű mozdonyokat, majd további típusokat fejlesztett ki, de változatlanul Kandó alapelveit követve. Így Olaszország után Svájcban is megjelentek a Kandó mozdonyok.

Az Olaszországot Svájjal összekötő Gothard alagút a kor mérnöki csúcsteljesítménye volt. Építése 1899-ben kezdődött és 6 évig tartott. Korábban is épültek vasúti alagutak, de egy 3000 méteres hegylánc alatt 20 km-es alagút építése rendkívüli követelményeket támasztott. Kőomlások, vízbetörések, 60 fokos hőmérséklet – mindez csekély átszellőzés mellett. A munkának 30 halálos áldozata volt. 70 évig ez volt a világ leghosszabb vasúti alagútja. Az első kísérleti meneteknél még gőzmozdonyt használtak, de bebizonyult, hogy gőzzel a rendszeres üzem megvalósíthatatlan. Érdekes, hogy a villamosítást svájci cégek kezdeményezték, saját költségükre. Ez a befektetés később bőven megtérült.

A különleges körülményekre való tekintettel a legmegbízhatóbb, kipróbált rendszer jöhetett számításba. A már 4 éve tökéletesen működő Valtellina vonal bebizonyította a háromfázisú rendszer megbízhatóságát, mellette döntöttek.

Ez a döntés érdekes, mert Svájc akkor már megkezdte a vasútvillamosítást AEG rendszerű, 15kV egyfázisú, 162/3 Hz-e, kommutátoros mozdonyokkal. De az egyfázisú rendszert Svájcban még csak elkezdték alkalmazni, nem volt kellő tapasztalat, és hátránya volt, hogy visszatáplálósos fűküzeme még nem volt. Az egyfázisú kisfrekvenciás rendszer az AEG befolyású területeken máig megmaradt,

bár a mai, áramirányítós, több-áramnemű mozdonyokat a kontinentális 50Hz-cel is lehetne táplálni – de az átalakítás nagy költséggel járna.

Magyarországon a vasútvillamosítás 1932-ben a Kandó által tervezett 16kV-os, 50Hz-es, egy fázissal táplált fázisváltós, aszinkron motoros mozdonyokkal kezdődött. Ez a háromfázisú rendszer továbbfejlesztett változata volt – a mozdonyban levő forgógépes fázisváltóval. Ma a Kandó rendszer reneszánszát éljük, aszinkron motorokkal, egyfázisú, 25kV, 50Hz táplálással, de forgógépes fázisváltó helyett teljesítményfélvezetős áramirányítóval. Erről a külföldi technikátörténet elfeledkezik, a mi feladatunk, hogy megőrizzük emlékét.

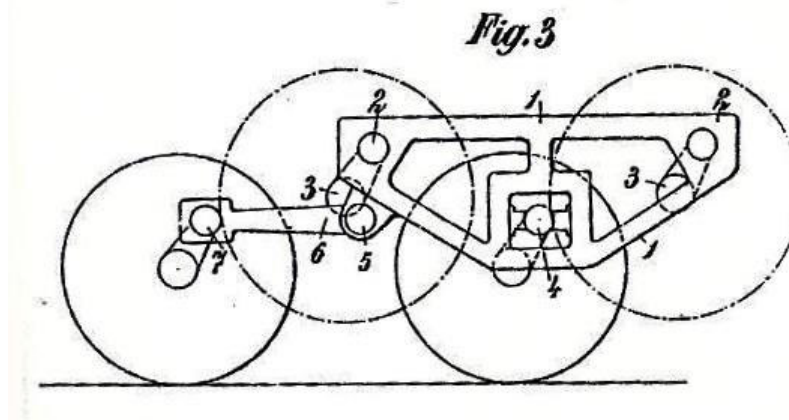
Milyen volt az RA 363-as mozdony, és miben különböztek a BBC mozdonyok?

Kandó alapelvei a következők voltak:

3 fázisú, aszinkron motoros hajtás.

3000V körüli felsővezeték. A kettős felsővezeték miatt a feszültséggel nem lehetett feljebb menni. Két fázisvezeték, a harmadik fázis a sín.

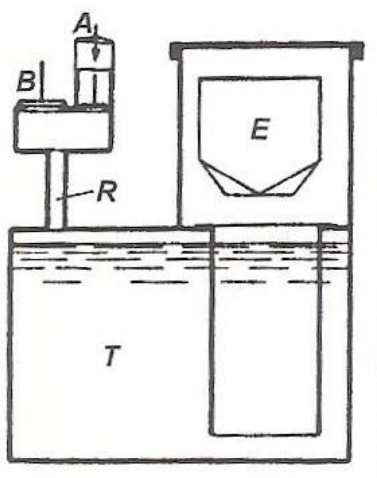
Közvetlen, fogaskerék hajtómű nélküli hajtás. A mozdonyban elhelyezett két alacsony fordulatszámú motor rudazattal hajtotta a kerekeket. A rugózott hajtómotorok és a rugózatlan kerekek közötti kapcsolatot és a forgatónyomaték egyenlő átvitelét Kandó találmánya, a Kandó-háromszög és kulisszás hajtómű tette lehetővé.



10. ábra: Kandó háromszög

Az alacsony fordulatszám érdekében volt a frekvencia 15Hz. Ez teljesen más ok, mint a kommutátoros egyfázisú motoroknál a $162/3$ Hz, amit a kefe szikrázás elfogadható mértékűre csökkentése tett szükségessé.

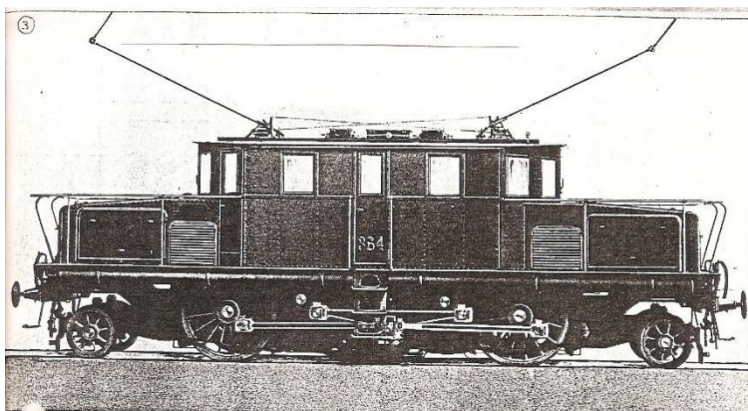
A sebességváltást a két motor kaszkád-kapcsolása tette lehetővé. Az indítás és a fokozatok közötti sebesség szabályozása pneumatikus (sűrített levegős) szintszabályozású vízindítóval történt. Ez folyamatos átmenetet és mágnesszeleppel önműködő áramszabályozást tett lehetővé.



11. ábra: Folyamatosan szabályozható ellenállású vízindító

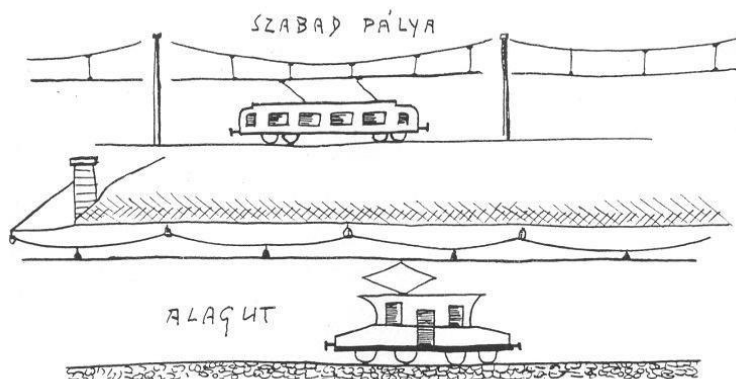
Mi változott a BBC mozdonyain?

Hasonlítsuk össze az RA 363-ast a BBC 364, 365 mozdonyaival



12. ábra: BBC gyártmányú, de folyamatosan számozott, 364-es mozdony

Ami azonnal feltűnik: az áramszedő. A Valtellinán a próbáknál sorozatosan törtek az áramszedők – de csak az alagutakban. Okát Kandó munkatársa, Tóth László derítette ki és talált rá megoldást. Tóth rajza mindent megmagyaráz: a szabad szakaszokon a felsővezeték függesztése hosszú rugalmas vezetékkel történt, ez kivédte a lengéseket. Az alagutakban a függesztés merev volt, ez okozta az áramszedő lengését. Megoldásként az alagutakban is hosszirányú tartókábelt alkalmazott.



15. ábra: Tóth László rajza

A hosszú Simplon alagútban ez nem volt megoldható, ezért a BBC az áramszedők végére rugalmas áramszedő-keretet szerelt. Ez annyira bevált, hogy Kandó átvette.

A frekvenciát 162/3Hz-re, a feszültséget 3300V-ra növelték, ez semmi változtatást nem igényelt

A motorok elhelyezése és a közvetlen, Kandó-háromszöges rudazat hajtás megmaradt.

A sebességváltás nem kaszkád kapcsolással, hanem pólusátkapcsolással történt.

A BBC későbbi mozdonyain a sebességváltás több lépcsős pólusátkapcsolással történt, 4 sebességgel (37,5, 50, 75, 100 km/h). A pólusátkapcsolást részben Kandó is átvette 1907-től.

A BBC a vízindító helyett fém ellenállásokat használt, több megcsapolású transzformátorral. Kandó megmaradt az egyszerű és folyamatosan szabályozható vízindítónál, ezt alkalmazta a későbbi, magyarországi fázisváltós mozdonyoknál is.

A BBC későbbi mozdonyainál is megmaradt a közvetlen rudazatos és Kandó háromszöges hajtás mellett, de a teljesítmény növelése érdekében a motorok után fogaskerékes hajtóművet épített be.

A svájciak a vonalat később meghosszabbították és 15 évig volt üzemben. Azután áttértek a Svájcban már elterjedt és bevált egyfázisú, 162/3 Hz-es 15 kV-os rendszerre. 1918-tól megoldották az egyfázisú visszatáplálásos fékezést. Északolaszország hegyvidéki vonalain viszont a háromfázisú Kandó rendszer egyes vonalai 70 évig üzemeltek.

Figyelemre méltó, hogy Kandó 3-fázisú rendszerét Svájcban is alkalmazták, a BBC gyártotta, és a szakmai kapcsolat a svájciak és Kandó között kétirányú volt.

Összefoglalás: A Svájcot Olaszországgal összekötő Simplon alagút vasútvonalának 1906-os megnyitásakor az Olaszországban már bevált háromfázisú Kandó rendszert alkalmazták, majd a mozdonygyártást a BBC is átvette.

Köszönetnyilvánítás: Köszönetemet nyilvánítom Fojtán István (Magyarország) és Hugo Wyss (Svájc) uraknak a cikk írásához nyújtott segítségért.

Források:

- [1] Fojtán István: Kandó mozdonyok, Magyar Vasúttörténeti Park Alapítvány, Budapest 2019, pp.41-62, 69-100.
- [2] Elektrotechnik und Maschinenbau: L. von Verebely: Elektrische Vollbahntraction in Italien, Wien, 1919 mai. 18, Heft 20, 37 Jahrgang, pp.209-216.
- [3] Sándor Jeszenszky, Antonio Savini, Hugo Wyss: The innovative three-phase electrification of the Simplon tunnel, IEEE, Svájc, 2025. pp.1-5.
- [4] Horváth Tibor, Jeszenszky Sándor,, A magyar elektrotechnika története, Magyar Elektrotechnikai Egyesület, Budapest, pp.104-110.
- [5] Elektrotechnika: A Simplon vasút új mozdonyai, lapszemle E. u. M. 1908. I. 12, Magyar Elektrotechnikai Egyesület, Budapest, 1908 febr. 1, p.13.