



HVDC (High-voltage Direct Current): Nagy villamos teljesítmény átvitele nagy egyenfeszültségen

2014. március 27-én került megrendezésre az Energetikai Szakkollégium Ganz Ábrahám emlékfélévének negyedik előadása, melynek témáját a nagyfeszültségű egyenáramú hálózatok témaköre adta. Kimpián Aladár, a BME VIK tiszteleti oktatója előadásában ismertette a HVDC átviteli sémáját, alkalmazásának előnyeit, hátrányait, fejlődésének történeti áttekintését egészen napjainkig, valamint műszaki, illetve gazdasági értékelését.

Az áramok háborúja

Arról, hogy a villamos energia továbbítása egyen, avagy váltakozó áram felhasználásával történjen, már a XIX. század 80-as éveiben elkezdődött a vita Thomas Alva Edison és Nikola Tesla között.

Edison ragaszkodott a háromvezetős (+110 V, 0, -110 V) egyenáramú rendszerhez, amely az Egyesült Államokban annak ellenére is jelentős területeket hódított meg, hogy az egyenáramú generátorokat sűrűn – egymástól kb. 1,5 mérföld (kb. 2,5 km) távolságra – kellett telepíteni. Ezt a nagy áramterhelés miatti nagy ohmos veszteség és a túl nagy feszültségesés indokolta.

A Tesla által szorgalmazott és Westinghouse által támogatott váltakozó áram döntő fölényét a magyar Ganz és Társa cég három zseniális mérnöke, Déri Miksa, Bláthy Ottó Titusz és Zipernowsky Károly által feltalált és szabadalmaztatott zárt vasmagú transzformátor és a fogyasztók párhuzamos kapcsolásának rendszere alapozta meg. Ezek lehetővé tették nagy teljesítmény szállítását nagy távolságra, kis veszteséggel.

A versenyt, hogy a villamosenergia-szolgáltatás egyen- vagy váltakozó áramú hálózatra épüljön-e, végül is a váltakozó áram elvi határok nélküli, több ezer MW-os teljesítmény-tartományban megvalósítható, egyszerű és viszonylag olcsó transzformálhatósága döntötte el. Ilyet az egyenárammal egyszerűen és gazdaságosan nem tudunk megvalósítani, azaz nem tudunk létrehozni egy több feszültségintű egyenáramú hálózatot.

Nemzeti és regionális villamosenergia-rendszerek

A XX. század első felében kialakultak az egyes országok váltakozó áramú nemzeti – nagyobb országok, mint pl. az Egyesült Államok, Kanada, Japán, a Szovjetunió esetén az egyes országrészek regionális – villamosenergia-rendszerei (Kerényi A. Ödön közkeletűvé vált rövidítésével VER-jei), a század második felében pedig létrejöttek a nemzeti, illetve regionális VER-ek egyesülései (ismét csak Kerényi A. Ödön rövidítésével VERE-i [villamosenergia-rendszer egyesülései]).

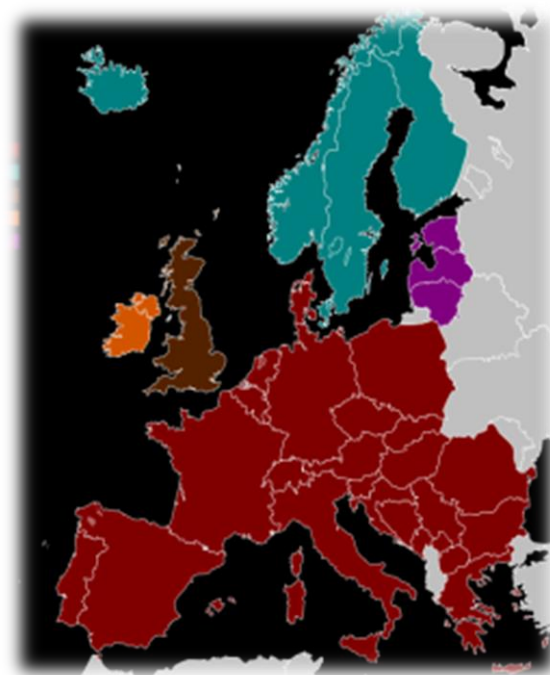
Ha a nemzeti, illetve regionális rendszerek önmagukban többé-kevésbé kiegyensúlyozottak voltak, azaz annyit termeltek, amennyit fogyasztottak, illetve a szomszédos rendszerek névleges frekvenciája ugyanaz volt, akkor a VER-eket kellően nagy átviteli képességű váltakozó áramú, nagyfeszültségű – a kontinentális Európában 400, 380 vagy 220 kV-os – távvezetékkel össze lehetett kötni. Így jött létre 1951-ben az európai kontinens első nagy VERE-je, az UCPTE (Union for the Coordination of Production and Transmission of Electricity), melyhez 1995. október 18-án mi is csatlakoztunk.

Az Európai Unió belső villamosenergia-piacának liberalizációja kapcsán 1999. július 1-én az UCPTE-ből kikerült a P, és lett UCTE, melynek Magyarország 2001. május 17-én lett teljes jogú tagja.

Az európai tag-rendszeregyesülések:

- **UCTE**
- **NORDEL** (Dánia (egy része), Finnország, Izland, Norvégia, Svédország)
- **UKTSOA** (Nagy-Britannia)
- **ATSOI** (Írország, Észak-Írország)
- **BALTSO** (Észtország, Lettország, Litvánia)

E tag-rendszeregyesülésekből alakult 2009. 07. 01-én az **ENTSO-E** (European Network of Transmission System Operators for Electricity).



1. ábra: Az európai tag-rendszeregyesülések

Két VERE váltakozó áramú távvezetéseken keresztül történő párhuzamos üzemének feltételei

A VERE-k összekapcsolásának számos, igen nagy körültekintést igénylő feltételei vannak:

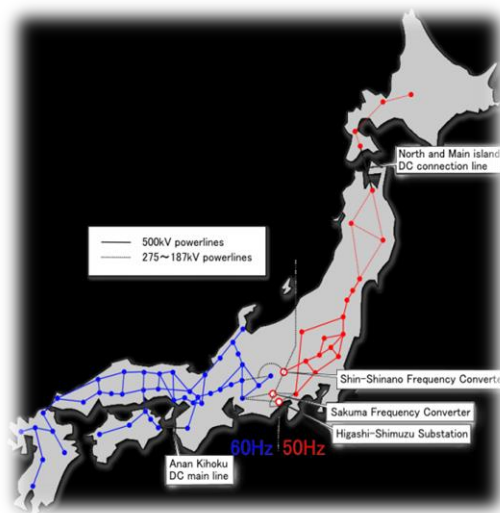
- Mindkét VERE legfeljebb néhány század Hz-cel térhet el a névleges frekvenciától, ellenkező esetben az összekapcsolás pillanatában olyan nagy teljesítményáramlás indul meg a nagyobb frekvenciájú VERE-ből a kisebb frekvenciájú VERE felé, amely meghaladhatja az összekötő távvezeték átviteli kapacitását, és a túlterhelés-védelem kikapcsolja a vezetéket, mielőtt a párhuzamos üzem létrejöhetett volna.
- Ha a két VERE frekvenciája közötti különbség tartósan nagy (néhány tized Hz), akkor a két VERE párhuzamos üzeme **egyenáramú betét** közbeiktatását igényli. (Így lehetett együttes üzemet tartani az UCPTÉ és a [volt] KGST országok CDU rendszeregyesülése között, 3 db, egyenként 600 MW átviteli kapacitású egyenáramú betéttel, német-csehszlovák osztrák-csehszlovák és osztrák-magyar irányban, Etzenricht, Dürnrohr és Wien Südost alállomásokon.)
- Legyen megfelelő nagyságú tartalékteljesítmény (pl. erőművi forgó-tartalék és/vagy gyorsindítású gázturbinák, import a szomszédoktól), hogy blokk-kiesés esetén a hiányzó teljesítményt meghatározott idő – legfeljebb néhány perc – alatt pótolni lehessen. Amíg a hiányt a szenvedő VER, illetve VERE a tartalékai bevetésével vagy fogyasztói korlátozással meg nem szünteti, addig az megoszlik az együttműködő VER-ek, illetve VERE-k között, és a közös frekvencia kisebb lesz.

Nagy egyenfeszültségen történő nagyteljesítményű villamosenergia-átvitel

A nagy váltakozó feszültséget egyenirányítják (azaz váltakozó áramból egyenáramot „készítenek”), majd a kapott nagy egyenfeszültséget váltóirányítják (azaz egyenáramból váltakozó áramot „készítenek”).

Változatok:

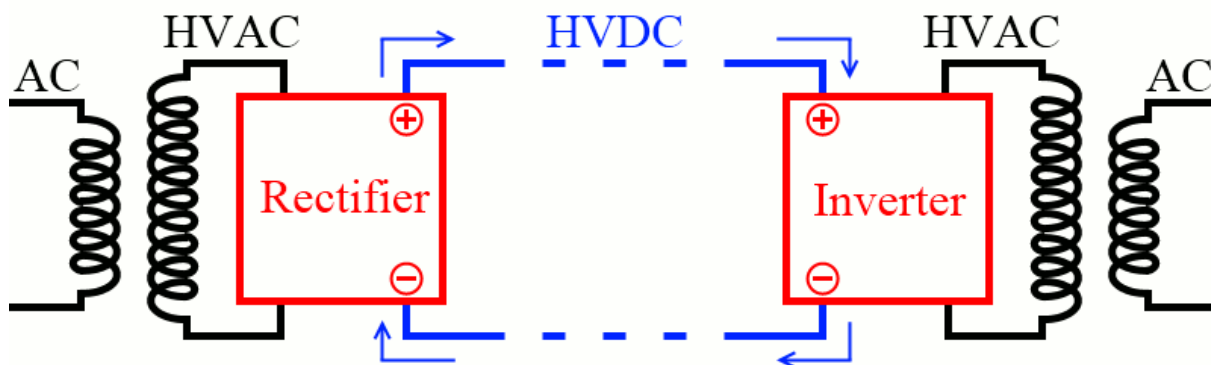
1. Az összekapcsolandó VERE-k névleges frekvenciája azonos (pl. UCTE-CDU viszonylatban 50 Hz) vagy különböző (pl. Japán északi fele 50 Hz, nyugati fele 60 Hz frekvenciájú), és mind az egyen-, mind a váltóirányítás ugyanazon a helyen (erőműben, alállomáson) történik; a berendezés neve: egyenáramú betét (back-to-back station, Gleichstromkurzkupplung)



2. ábra: Japán 50, illetve 60 Hz-es villamosenergia-hálózata

2. Az egyen- és a váltóirányítás különböző helyeken történik, és ezeket a konverter alállomásokat több száz vagy ezer kilométer hosszúságú nagyfeszültségű egyenáramú távvezeték (szabadvezeték vagy [tenger alatti] kábel) köti össze.

A szakirodalom mindkét változatot HVDC (**h**igh **v**oltage **d**irect **c**urrent) összeköttetésnek nevezi.



3. ábra: HVDC összeköttetés (A baloldalon látható piros blokk a nagyfeszültségű egyenirányító, a jobb pedig a váltóirányító)

A HVDC hálózatok előnyei és hátrányai

Előnyök:

- Nagyobb az áramvezetőkénti átvihető teljesítmény.
- A DC szabadvezeték szerkezete egyszerűbb, mint az AC vezetéké; kisebb a nyomvonal szélessége, egyszerűbb, tetszetősebb az oszlop.
- A föld használható üzemi áram-visszavezetőként.
- Következésképp minden egyes szigetelt áramvezető külön áramkört tud képezni.
- Nincs kapacitív töltőáram.
- Nincs skin-hatás (azaz az áramvezető egyenáramú ohmos ellenállása kisebb, mint a váltakozó áramú).
- Az egyenáramú kábelek nagyobb feszültség-gradienssel üzemelhetnek.
- Az egyenáramú távvezeték teljesítmény-tényezője mindig egységnyi, azaz nincs meddőteljesítmény, csak hatásos.
- Kisebb a koronasugárzási veszteség és a rádió-interferencia, mert az áramvezető körüli állandósult tértöltés virtuális átmérő növekedést okoz.
- Nem szükséges, hogy az egyenáramú távvezeték végponti alállomásai szinkronban legyenek egymással.
- Következésképp a távvezeték hosszát nem korlátozza a stabilitás.
- Aszinkron üzemelő vagy különböző névleges frekvenciájú VER-ek vagy VERE-k összekapcsolhatók.
- Az egyenáramú távvezeték rövidzárlati áramai kisebbek, mint a váltakozó áramúé.
- A váltakozó áramú villamosenergia-rendszer perturbációit (pl. zárlatait, lengéseit) sem az egyenirányító, sem az inverter nem engedi át (tűzfal), azaz a velük összekapcsolt váltakozó áramú rendszerek nem tudják megnövelni egymás zárlati teljesítményét.
- Az egyenáramú összeköttetésen keresztül áramló teljesítmény könnyen szabályozható.
- Adott szigetelés (pl. léghöz, kábel érszigetelése) $\sqrt{2}$ -ször nagyobb feszültséget bír el.
- A DC kábelösszeköttetés hossza többszöröse lehet az AC-énak

Hátrányok:

- Az áramirányítók drágák.
- Az áramirányítók jelentős meddő teljesítményt igényelnek, amelyet a konverter alállomásokon kell előállítani.
- Az áramirányítók felharmónikusokat termelnek, ezért szűrőkörökre van szükség.
- Az áramirányítókat kevésbé és sokkal rövidebb ideig lehet túlterhelni, mint a váltakozó áramú kapcsolóberendezéseket.

- Mivel korábban nem létezett nagyfeszültségű egyenáramú megszakító, ez akadályozta többvégpontú (multiterminális) vagy hálózatos alakzatok létrehozását. **2012 óta léteznek félvezetős és kombinált HVDC megszakítók, tehát létesíthetők többvégpontú HVDC alakzatok.**
- Földvisszavezetési monopólusú üzemben elektrokémiai korrózió lép fel, amely kikezdi a fém csővezetéseket; az ez elleni védekezés költségnövelő.

A HVDC-k történeti áttekintése

A váltakozó áramú villamosenergia-rendszereken (VER-eken) belüli vagy ezek közötti **első ipari méretű nagyfeszültségű egyenáramú összeköttetést** az ASEA létesítette **1954-ben** a svéd száraz-föld és a sörfőzéséről híres **Gotland** sziget között. A 96 km-es, 100 kV-os, 200 A-es, 20 MW-os, higanygőz-áramirányító monopoláris összeköttetés zömmel a tengerfenéken, kábelben halad.

Kanadában, a Nelson River torkolata közelében lévő nagy vízerőművektől indul az 1977-ben épült 895 km-es, ± 450 kV-os, 1620 MW-os Bipole 1, majd az 1985-ben épült 937 km-es, ± 500 kV-os, 1800 MW-os Bipole 2 egyenáramú távvezeték, a 700 000 lakosú Winnipeghez közeli fogadó-állomással, amely még higanygőz egyen- és váltóirányítókkal létesült.



4. ábra: A Nelson River torkolathoz közeli vízerőműveket Winnipeggel összekötő HVDC távvezeték

Mozambik legnagyobb folyóján, a bővizű Zambezin, az indiai-óceáni torkolattól kb. 1000 km-re épült a **Cabora Bassa** vízerőmű. Az ötgépes Cabora Bassa erőmű összteljesítménye $5 \times 415 = 2075$ MW. Az erőmű alállomásának fő berendezése a 400 kV-os váltakozó áramot ± 533 kV-os egyenárammá átalakító konverter. Az erőmű egyenirányító alállomásától 1414 km-es, ± 533 kV-os, 1920 MW átviteli képességű bipoláris egyenáramú távvezeték megy a Dél-afrikai Köztársaságban, Johannesburg közelében lévő Apollo alállomásig. Az 1977-79 között épült 7000 oszlopos távvezeték két, egymástól 1 km-re lévő oszlopsoron halad, az áramvezető 4×565 , a védővezető 1×117 mm²-es. Földvezetése kb. 2000 km hosszban elnyúló, mintegy 150 m vastag feketeszen-mező, melybe csak le kellett fúrni.

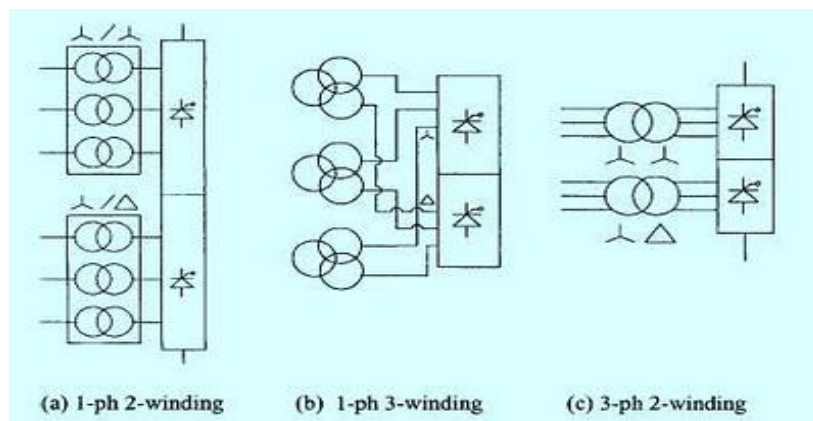
2008-ban helyezték üzembe a világ legnagyobb átviteli kapacitású, nagyfeszültségű egyenáramú kábelét a norvégiai Feda és a hollandiai Eemshaven között. Az 580 km-es

kábel terhelhetősége 700 MW. Készítéséhez 9000 t rezet és 12 000 t ólmot használtak fel, össztömege 47 000 t.

Brazíliában, az ország ÉNY-i részén nagy kapacitású vízerőműveket építenek. Ezek teljesítményét a Porto Velho-i konverter alállomástól 2500 km-es, ± 600 kV-os, 3150 MW átviteli képességű egyenáramú távvezetékkel szállítják el az Araraquara-i inverter alállomásra, Sao Paulo nagy fogyasztású körzetébe.

Az egyen- és váltóirányítókhoz csatlakozó transzformátorok szokásos konfigurációi:

- (a) Egyfázisú, kéttekercselésű transzformátorokból összeállított 2 db háromfázisú csoport, az egyik szekundere csillag, a másiké delta kapcsolású.
- (b) Egyfázisú, háromtekercselésű transzformátorokból összeállított 1 db háromfázisú csoport, az egyik szekunder tekercselés csillag, a másiké delta kapcsolású.
- (c) 2 db háromfázisú transzformátor, az egyik szekunder tekercselése csillag, a másiké delta kapcsolású.



4. ábra: Szokásos transzformátor konfigurációk

Az (a) kapcsolás szerinti egyfázisú, kéttekercsű, csillag/delta kapcsolású ABB transzformátor, a 2000 km-es Xiangjiaba-Shanghai ± 800 kV-os, 6400 MW-os egyenáramú átvitel egyenirányítóihoz és invertereihez való csatlakozásra. Hátterben a primer tekercs $500/\sqrt{3}$ kV-os szabadtéri kivitelű, ernyős átvezető szigetelője, előtérben a szekunder tekercs kb. 14 m-es kompozit átvezetői.



5. ábra: "a" kapcsolás szerinti ABB transzformátor

A (b) kapcsolás szerinti egyfázisú, egy $500/\sqrt{3}$ kV-os primer és két 800 kV-os szekunder tekercsű transzformátor a kínai Yunnan-Guangdong 1438 km-es, ± 800 kV-os, 5000 MW-os egyenáramú átvitel egyenirányítóihoz és invertereihez való csatlakozásra. Balra a delta, jobbra a csillag kapcsolású szekunder tekercs átvezetői. (A felvétel a gyártómű próbatermében készült.)

A (c) kapcsolási változat szerinti 2 db háromfázisú, kéttekercses transzformátor; az egyik csillag/csillag, a másik csillag/delta kapcsolású.



6. ábra "b" kapcsolás szerinti Siemens transzformátor



7. ábra: "c" kapcsolás szerinti transzformátor

Egyenáramú távvezetékek

± 500 kV-os egyenáramú távvezeték feszítőoszlopa négyes kötegű áramvezetővel és kettős feszítő szigetelőláncokkal, melyek áganként 44 db egysapkás szigetelőből állnak. Az áramkötések oszlophoz lengését korlátozzák a tartóláncok.



8. ábra: ± 500 kV-os DC távvezeték feszítőoszlopa



10. és 11. ábra:

A kínai ± 800 kV-os, 5-7000 MW átviteli kapacitású egyenáramú távvezetékek jellemző nyomvonala (jobbra), illetve egy saroktartóoszlopa (balra).

A modern HVDC

1. 2012. novemberében az ABB bejelentette, hogy elkészült a nagyfeszültségű hibrid (villamos félvezetős és mechanikus) egyenáramú megszakító prototípusa. Ez lehetővé teszi kiterjedt, sok csomópontú, nagyfeszültségű egyenáramú hálózatok létrehozását, amelyeken óriási teljesítmények áramolhatnak kis veszteséggel.

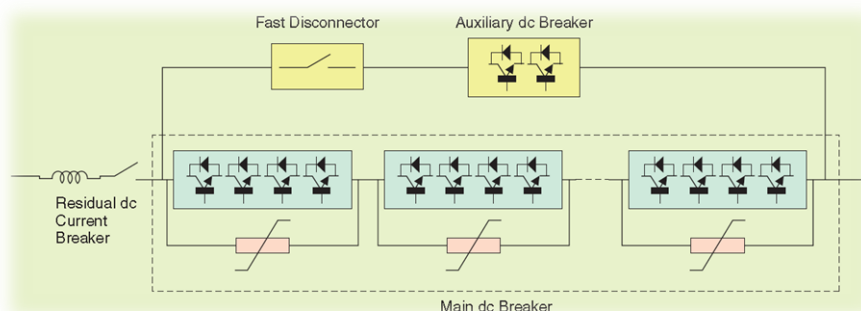
2. Mivel az off-shore szélparkok a tengerpartoktól egyre távolabbra „merészkednek”, nemsokára eléri azt a távolságot, amelynél a váltakozó áramú tengeralatti erőátviteli kábel kapacitív töltőárama eléri a kábel termikus határáramát, így azon már hatásos teljesítmény nem szállítható. Ez – ha veszteségcsökkentési érvek nem lennének is – kikényszerítené az MVDC vagy HVDC kábelek alkalmazását.

3. Az új áramtermelési technikák egy része (üzemanyag-cella, fotovoltaiikus eszközök) eleve egyenáramot állít elő.

4. Egyes szakértők becslése szerint ma a világon előállított váltakozó áramú villamos energia 60%-át egyenáramúvá alakítva használják fel.

Forradalminak ígérkező készülék: a nagyfeszültségű hibrid (villamos félvezetős és mechanikus) egyenáramú megszakító, mely a következőképpen működik:

1. Üzemszerűen a sárga áramkör (a kevés félvezető elemből álló, ezért kis ohmos ellenállású, kis veszteségű segéd DC megszakító és a vele sorba kapcsolt igen gyors mechanikus szakaszoló) vezeti a több kA nagyságú egyenáramot.
2. Szándékolt vagy védelmi „ki” parancsra lezár a segéd DC megszakító, majd miután az áram áttérrelődött a (kézzel jelölt) sokszekciós, sokelemes fő DC megszakítóra, kikapcsol a gyors szakaszoló.
3. Most zárásba vezérlik a fő DC megszakítót. Ha közben túl nagy feszültség jutna a szekció(k) félvezető elemeire, azt a megszólaltató (rózsaszínnel jelölt) varisztorok levezetik.
4. Miután a fő DC megszakítóban megszűnt az áram, működik a megszólaltató varisztorok maradékáramát kikapcsoló megszakító is.



12. ábra: Hibrid HVDC megszakító sematikus ábrája

Műszaki-gazdasági értékelés

Kínai számítások szerint 10 000 MW teljesítmény 3000 km-re történő szállításához a különböző (nagy- és ultra nagy) feszültségű és rendszerű távvezetésekből az ábrán látható darabszámú szükséges. Az átviteli veszteség a ± 1000 kV-os egyrendszerű egyenáramú távvezeték esetén a legkisebb.

„Coal by wire” – inkább áramot szállítsunk, mint szenet – mondják Kínában

Hasonlítsuk össze a nagyfeszültségű egyen- és váltakozó áramú átvitel költségeit az átviteli távolság függvényében!

AC: olcsó végpontok – drága távvezeték

DC: drága végpontok – olcsó távvezeték

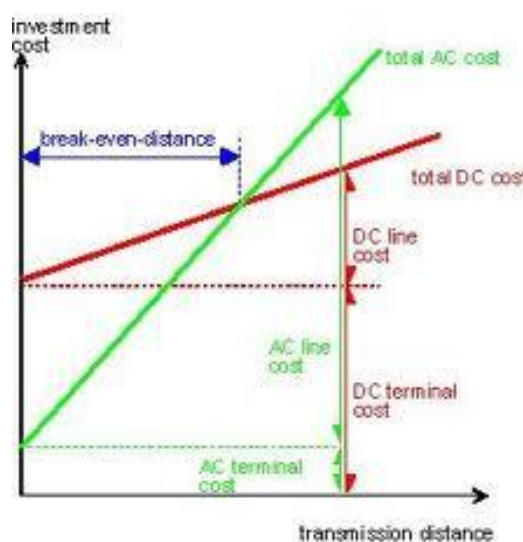
A zöld AC és a piros DC egyenesnek nyilván létezik metszéspontja: ilyen hosszú összeköttetés esetén az AC és a DC változat beruházási költsége egyenlő. Kisebb távolságra az AC, nagyobbra a DC olcsóbb. A kék metszésponthoz tartozó hossz szabadvezeték esetén kb. 600 km, kábelnél kb. 60 km.

A konkrét értékeket számos, itt fel nem sorolt tényező befolyásolja.

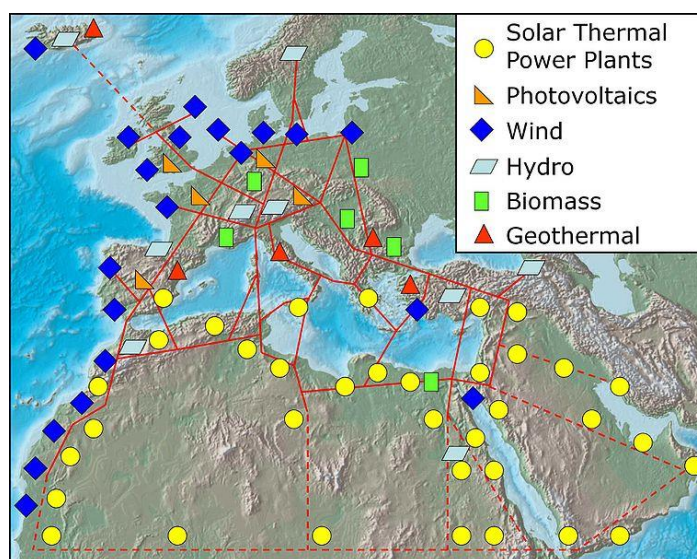
Remote power resources:
Transmission alternatives 10.000 MW - 3000 km

		Line losses
	800 kV AC	20 %
	660 kV HVDC	13 %
	800 kV UHVDC	11 %
	1000 kV UHVDC	9 %

13. ábra: AC és DC távvezetékek veszteségei különböző feszültségeken



14. ábra: AC és DC átvitel költségei a távolság függvényében



15. ábra Az egyenáramú Európai Szupergrid, ahogyan azt dr. Gregor Czisch, a németországi Kasseli Egyetem professzora elképzei

Összefoglalás

Az a tény, hogy villamos készülékeink nagyobbik hányada egyenáramot használ, még nem indokolja az egyenáramú energiaátvitelre való teljes átállást. A nagyfeszültségű egyenáramú hálózatok alkalmazása egyelőre csak igen nagy távolságok áthidalása esetén kifizetődő, de a technológia fejlődésével egyre komolyabb vetélytársa lesz az AC hálózatoknak.

Kelemen Zsolt

Az Energetikai Szakkollégium tagja