

Nagyteljesítményű villamosenergia-átvitel nagy egyenfeszültségen

Előadás az Energetikai Szakkollégiumban

BME VIK Villamos Energetika Tanszék
Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoport

Kimpián Aladár tiszteleti oktató

Budapest, 2014. 03. 27.

Rövid történeti bevezető (már a régi görögök is ...)

Az emberiség kollektív tapasztalata szerint a **világegyetem elválaszthatatlan, megszüntethetetlen és mindenütt jelenvaló része az elektromágneses tér.**

A XIX. század óta, Michael **FARADAY** és James Clerk **MAXWELL**, valamint elődeik, André Marie **Ampère**, Hans Cristian **Ørsted**, Jean Baptiste **Biot**, Felix **Savart** és mások munkássága nyomán tudjuk, hogy az elektromágneses tér – **erőtér**, amely munkát tud végezni.

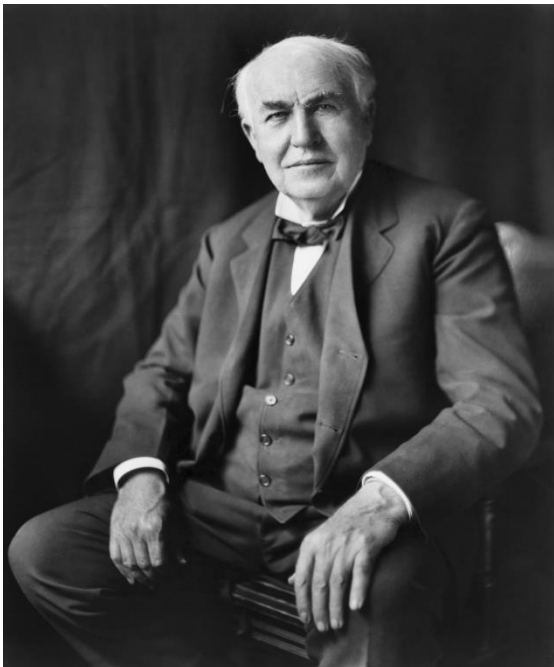
Ugyanettől az időtől a találékony emberiség számtalan olyan eszközt hozott létre, amelyet „áram hajt”, azaz működéséhez villamos energia szükséges.

De: az emberiség máig adós annak feltalálásával, hogy a természetben az eszközök működtetésére közvetlenül felhasználható formában nem található villamos energiát miképpen lehetne olyan „kvantumokban” előállítani, amilyenek ezeknek az eszközöknek a működéséhez illeszkednének (pl. kicsiny tömegű, 1500 W-os áramtermelő „izé” az 1500 W-os porszívóhoz).

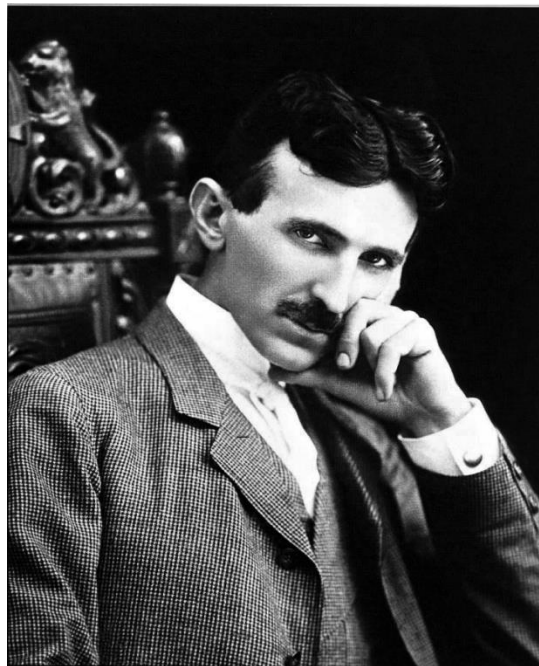
Marad tehát a jó öreg villamos hálózat, amely a kisebb-nagyobb erőművekben koncentráltan megtermelt villamos energiát elszállítja az „áram által működtetett eszközökhöz”: a fogyasztókhöz.

A vita – időnként háborúság („the War of Currents”) – arról, hogy ez a nélkülözhetetlen hálózat a Thomas Alva **EDISON** által favorizált **egyenáramú**, vagy a Nikola **TESLA** által feltalált és szabadalmaztatott, George **Westinghouse** által anyagilag támogatott **váltakozó áramú** legyen-e, már a XIX. század nyolcvanas éveiben elkezdődött.

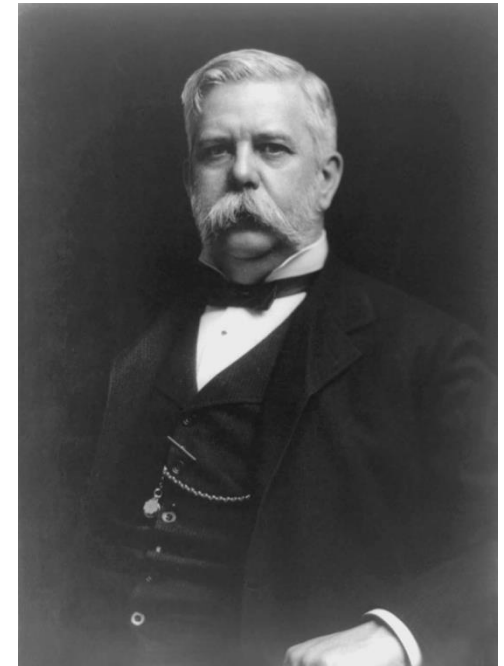
Edison



Tesla

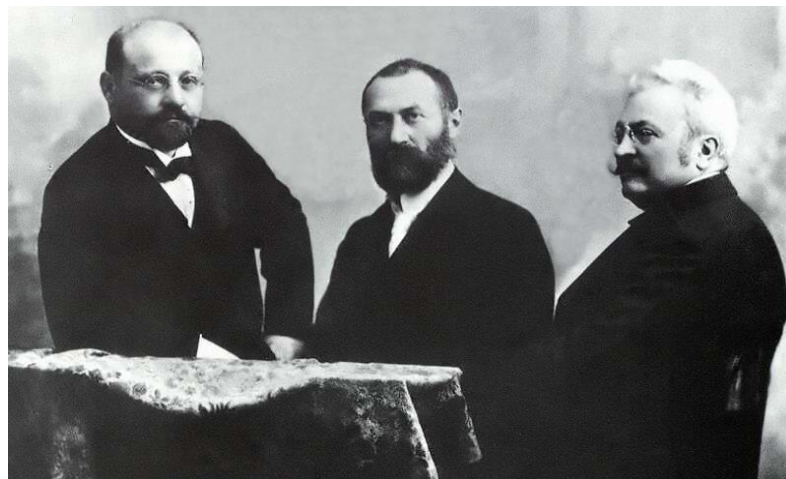


Westinghouse



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

A Tesla által szorgalmazott és Westinghouse által támogatott váltakozó áram döntő fölényét a magyar Ganz és Tsa 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, amelyek lehetővé tették nagy teljesítmény szállítását nagy távolságra, kis veszteséggel.



Edisonék különböző eszközökkel sokáig igyekeztek megakadályozni a váltakozó áram térhódítását:

- Sajtókampányt indítottak a közönség meggyőzésére, hogy a váltakozó áram sokkal veszélyesebb, mint az egyenáram.
- Bár Edison ellenezte a halálbüntetést, az az elhatározása, hogy ellehetetleníti a váltakozó áramú rendszert, vezetett oda, hogy egyik alkalmazottja, Harold P. Brown megkonstruálta az első villamosszéket, melyet természetesen váltakozó árammal működtettek.

De minden ármány ellenére a váltakozó áram folytatta térhódítását, mind a termelés, mind a felhasználás terén: ahogy nőtt a motorikus fogyasztók száma és teljesítménye, úgy vált egyre általánosabbá a váltakozó áramú termelés, átvitel, elosztás és fogyasztás és szorult vissza az egyenáramú hálózat. A sporadikusan megmaradt egyenáramú fogyasztókat többé már nem egyenáramot termelő erőművek, hanem a váltakozó áramú hálózatról táplált egyenirányítók látták el.

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 egyszerű módon és eszközökkel nem tudunk csinálni, azaz nem tudunk létrehozni egy több feszültség szintű egyenáramú hálózatot.

Segítette a döntést az orosz Mihail Oszipovics **Dolivo-Dobrovolszkij**nak, az AEG mérnökének találmánya, a **kalickás forgórészű, háromfázisú váltakozó áramú aszinkron motor**, amely a ma létező legegyszerűbb villamos forgógép, és amelyet szerte a világon széles teljesítmény-tartományban és óriási mennyiségben gyártottak és gyártanak.

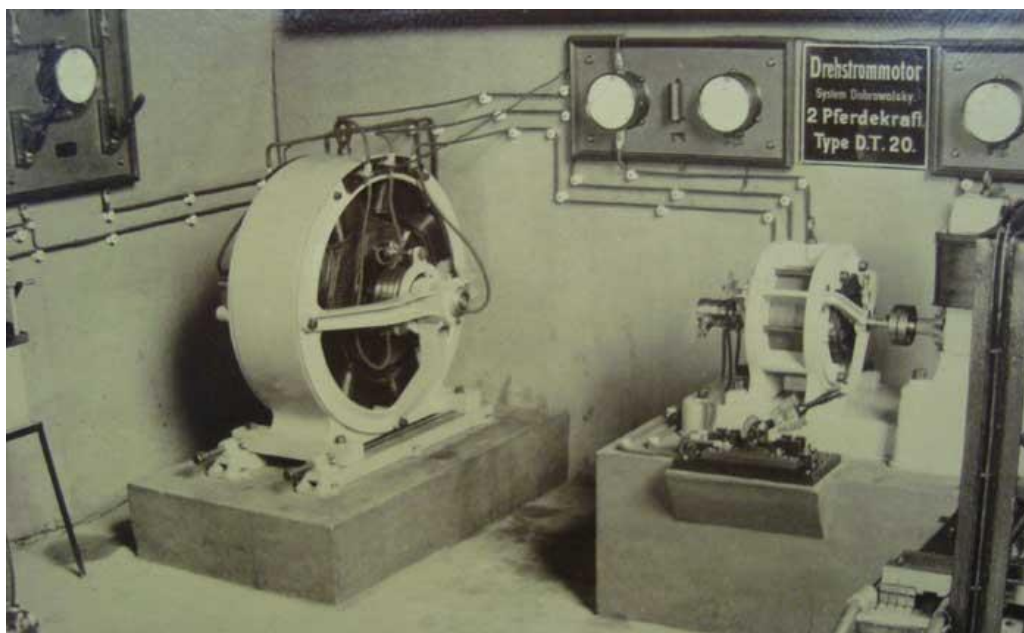
Dolivo-Dobrovolszkij (1862, Szentpétervár – 1919, Heidelberg), a rigai műszaki egyetemen tanult, majd a II. Sándor cár elleni 1881-es sikeres bombamerénylet követő represszió elől Németországba távozott. Tanulmányait a darmstadti műegyetemen folytatta, majd belépett az Allgemeine Elektrizitätswirtschafts-AG (AEG)-hez, és haláláig itt dolgozott.

A **háromfázisú váltakozó áram** döntő áttörését hozta az 1891-es frankfurti Nemzetközi Elektrotechnikai Kiállítás, melynek világítási és motorikus fogyasztóit a Lauffen am Neckar-i vízerőmű általa konstruált, 150 f/min fordulatszámú, 40 Hz-es, 200 kVA-es, 50 V-os generátora táplálta háromfázisú váltakozó árammal, feltranszformálva, egy 175 km-es, 15 kV-os, szintén általa tervezett távvezetéken keresztül.

M. O. Dolivo-Dobrovolszkij



és 2 lóerős háromfázisú aszinkron motorja



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 e 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 – távvezetékekkel össze lehetett kötni. Így jött létre 1951-ben az európai kontinens első nagy VERE-je, az **UCPTE** (**U**nion for the **C**oordination of **P**roduction and **T**ransmission of **E**lectricity), 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-rendszerezegyesülések:

Bordó: UCTE

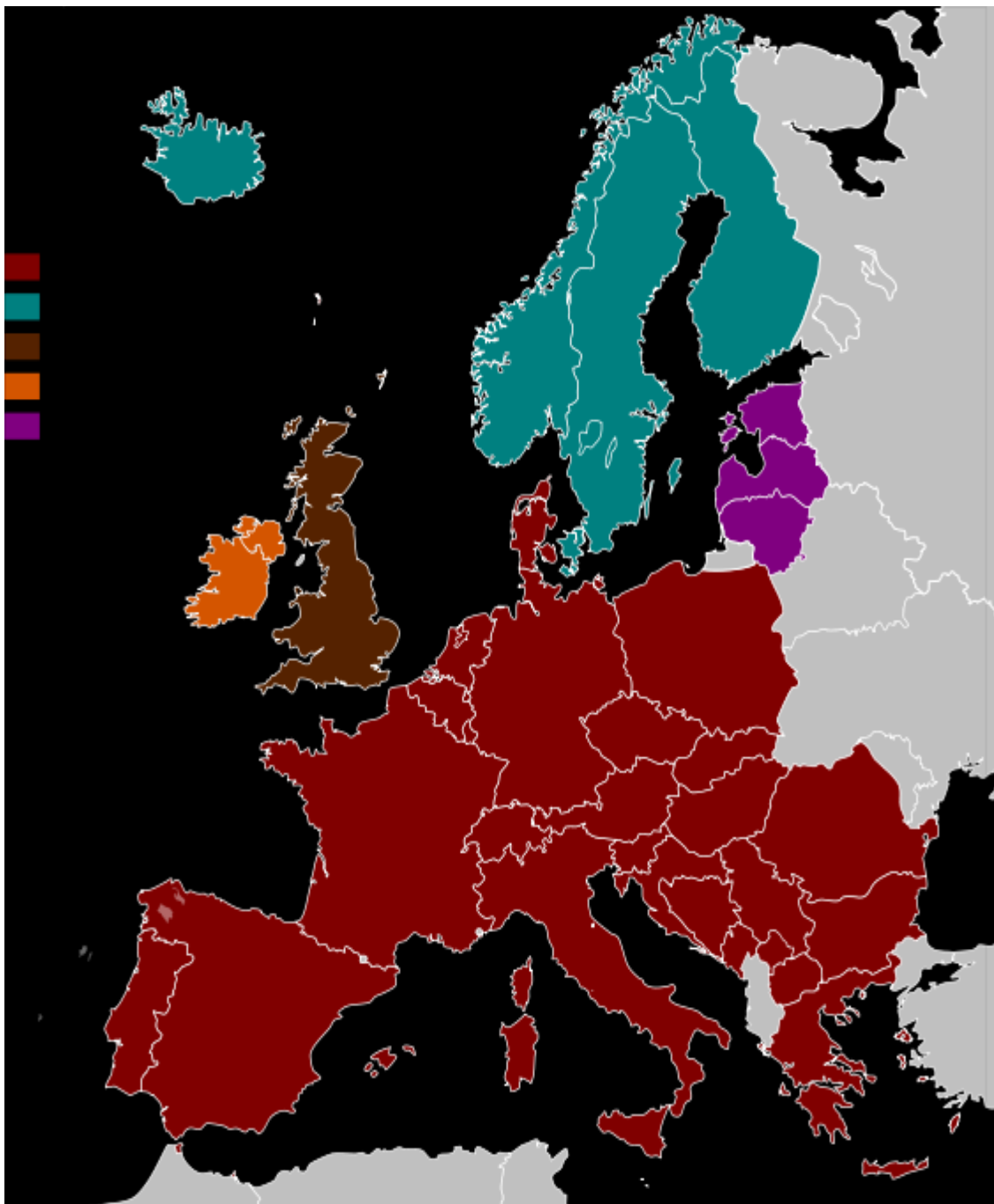
Zöld: NORDEL (Dánia [egy része], Finnország, Izland, Norvégia, Svédország)

Barna: UKTSOA (Nagybritannia)

Narancs: ATSOI (Írország, Észak-Írország)

Lila: BALTSO (Észtország, Lettország, Litvánia)

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

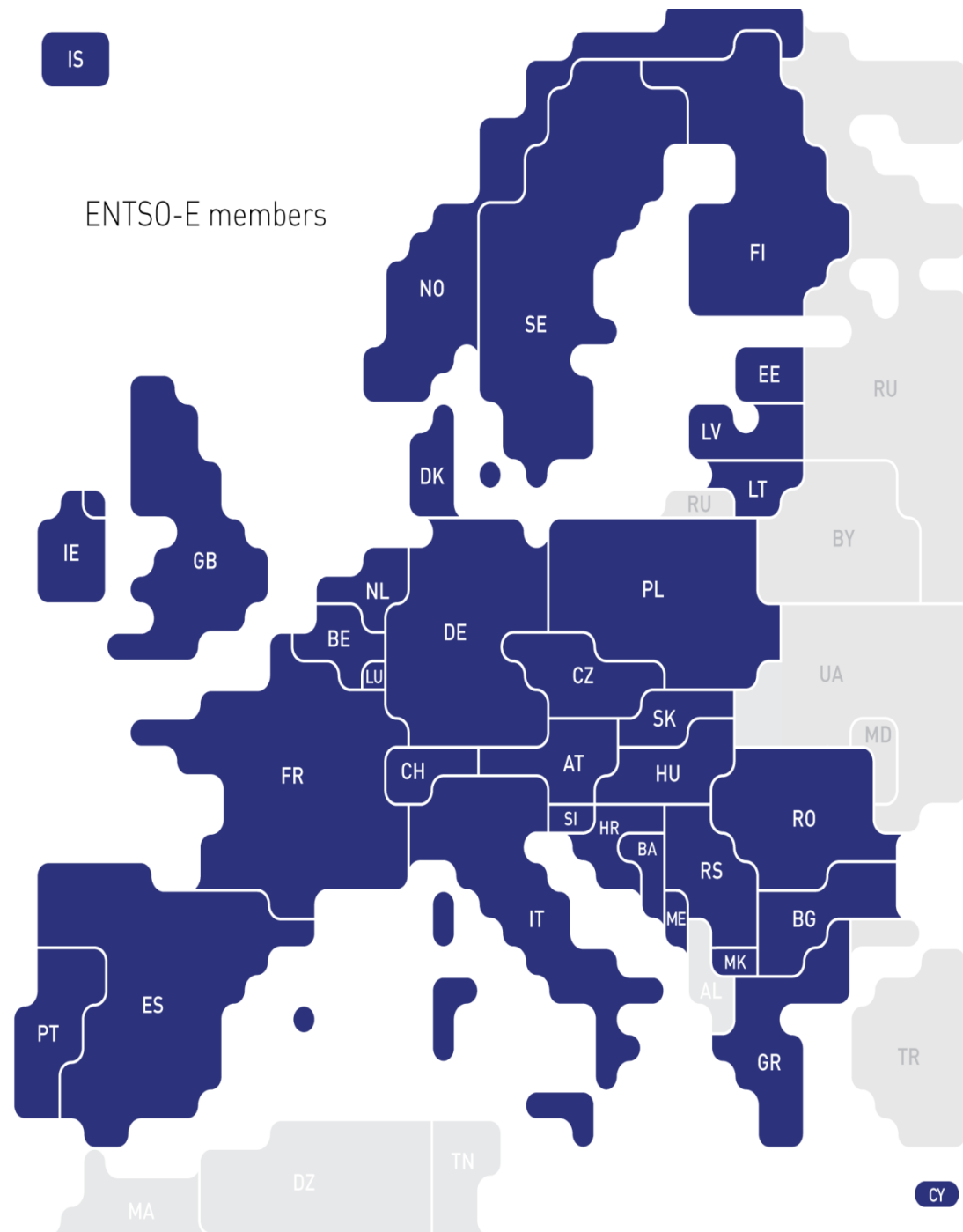


Az egységes **ENTSO-E** 34 tagországa és térképe.

Nem tagok: Albánia, Törökország és a Szovjetunió európai utódállamai közül Belarusz, Moldova, Oroszország és Ukrajna.

Milyen feltételeknek kell teljesülniük két villamosenergia-rendszer egyesülés váltakozó áramú távvezetékeken keresztül történő párhuzamos üzeméhez?

- Legyen azonos a két VERE névleges frekvenciája (pl. 50 Hz).



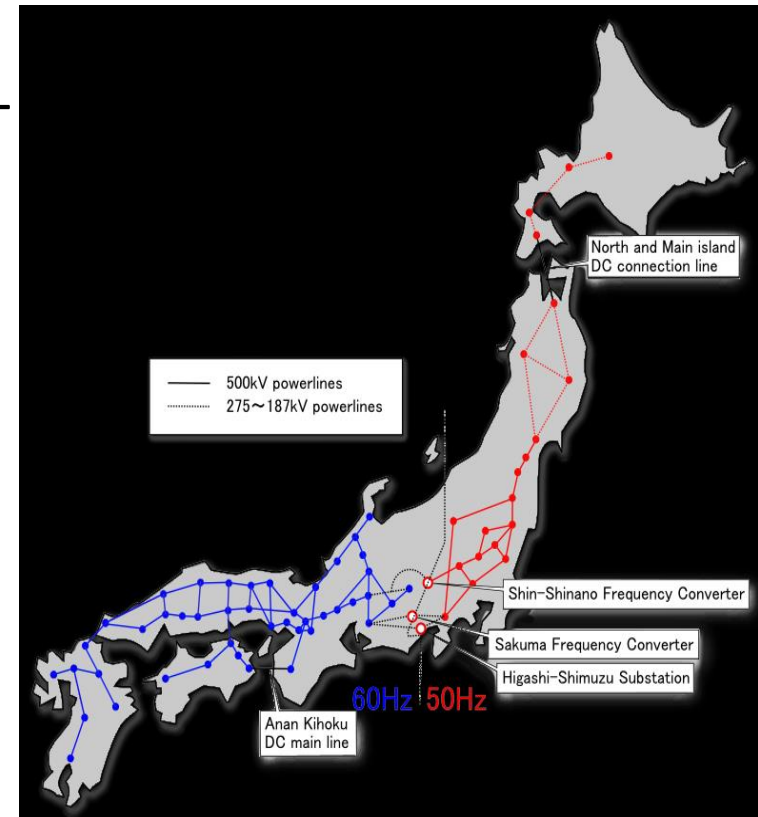
- Mindkét VERE legfeljebb néhány század Hz-cel térhet el a névleges frekvenciától, ellenkező esetben az összekapcsolás pillanatában olyan nagy teljesítményáramlás indul meg a nagyobb frekvenciájú VERE-ből a kisebb frekvenciájú VERE felé, amely meghaladhatja az összekötő távvezeték átviteli kapacitását, 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, Dürnröhr és Wien Südost alállomásokon.)
- Legyen megfelelő nagyságú tartalékteljesítmény (pl. erőművi forgótartalék 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.

Elérkeztünk a nagy egyenfeszültségen történő nagyteljesítményű villamosenergia-átvitel mára kiforrott, világszerte alkalmazott megoldásához:

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

Változatok:

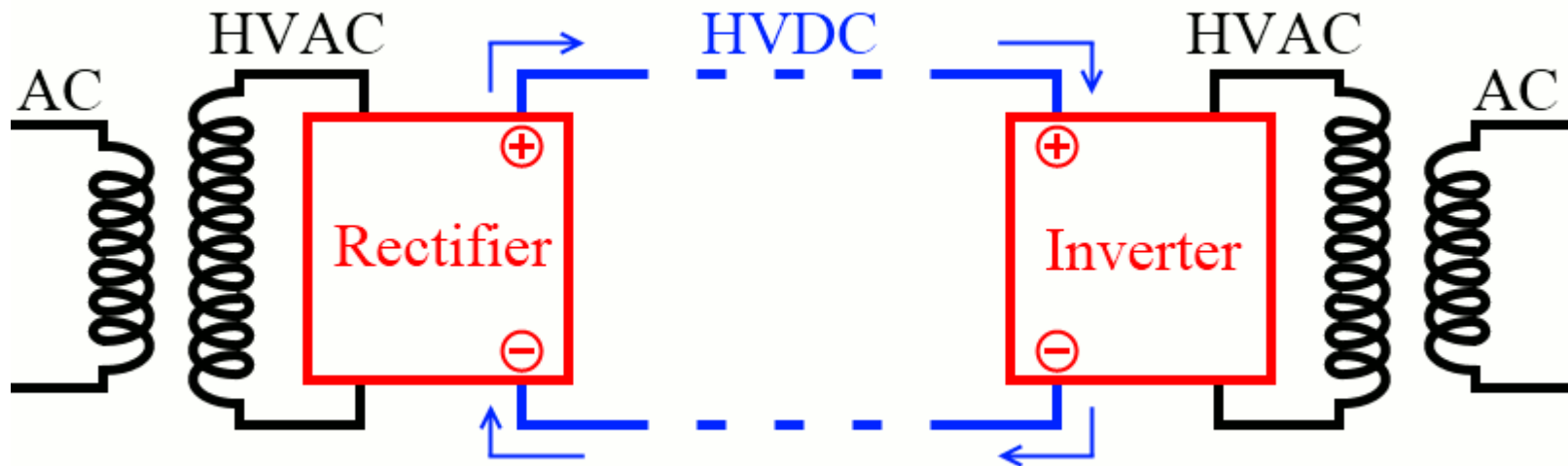
1. Az összekapcsolandó VERE-k névleges frekvenciája azonos (pl. UCTE-CDU viszonylatban 50 Hz) vagy különböző (pl. Japán északi fele 50 Hz, nyugati fele 60 Hz frekvenciájú), és **mind az egyen-, mind a váltóirányítás ugyanazon a helyen** (erőműben, állomáson) **történik**; a berendezés neve: **egyenáramú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



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

A szakirodalom mindkét változatot HVDC (**high voltage direct current**) összeköttetésnek nevezi.

(Az ábrán a bal oldali piros blokk a nagyfeszültségű egyenirányító, a jobb oldali a váltóirányító; HVAC = **high voltage alternating current**.)



Néhány elméleti alapfogalom

A **villamos töltés** a bennünket körülvevő anyagi világ mindenütt jelenlévő, elválaszthatatlan alaptulajdonsága. Villamos töltést sem létrehozni, sem megsemmisíteni nem lehet. Kétféle villamos töltés van: pozitív (ilyen a protoné) és negatív (ilyen az elektroné). Jele: Q , q . Mértékegysége: coulomb [C]. A villamos töltések nyugalomban vannak, vagy mozognak.

A villamosságtan (elektrotechnika) e nyugvó és mozgó villamos töltések által létrehozott **elektromágneses tér** tudománya.

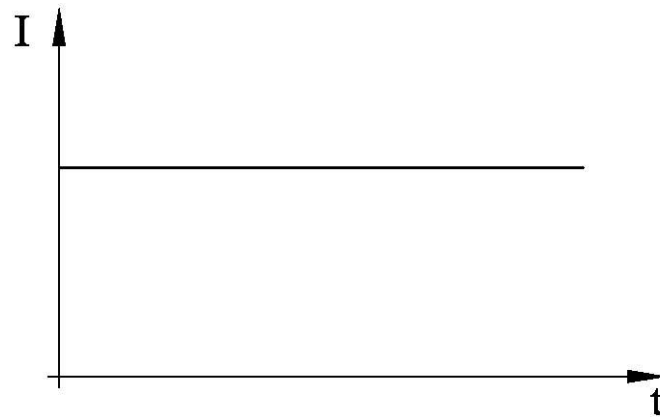
Villamos áram: a villamos töltések áramlása, amely maga körül mágneses teret hoz létre (állandó áram állandó mágneses teret, változó [váltakozó] áram változó [váltakozó] mágneses teret). Jele: I , i . Mértékegysége: amper [A].

1 A az áram(erősség), ha adott keresztmetszeten 1 C töltés 1 s idő alatt halad át.

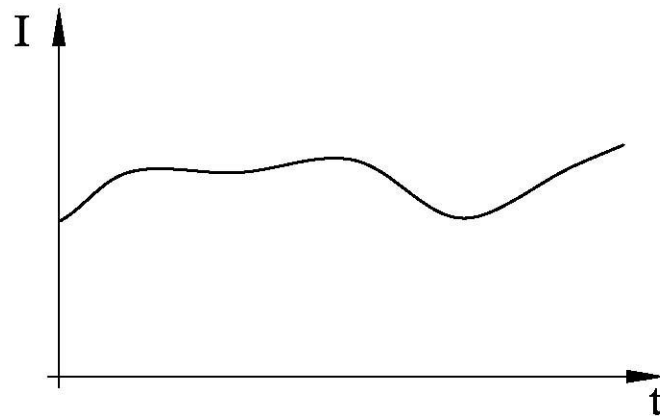
Képletben: $I [A] = Q/t [C/s]$

Egyenáram: Iránya állandó, megegyezés szerint a pozitív irányú áram a + potenciálú pontból a – potenciálú pont felé folyik, nagysága lehet állandó és lehet változó.

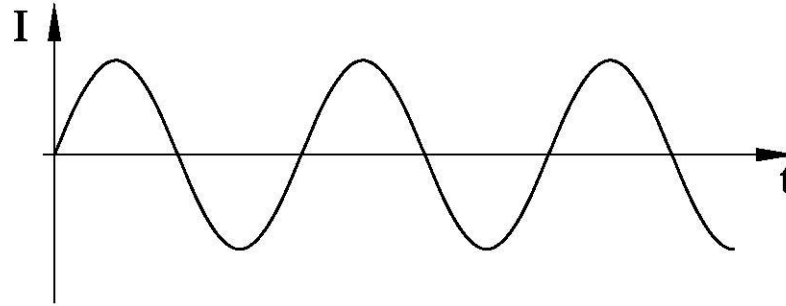
Állandó nagyságú egyenáram:



Változó nagyságú egyenáram:



Váltakozó áram: Legegyszerűbb esete a köznapi szinuszos váltakozó áram; azonos ideig folyik + és – irányban, eközben amplitúdója (csúcsértéke) változhat.



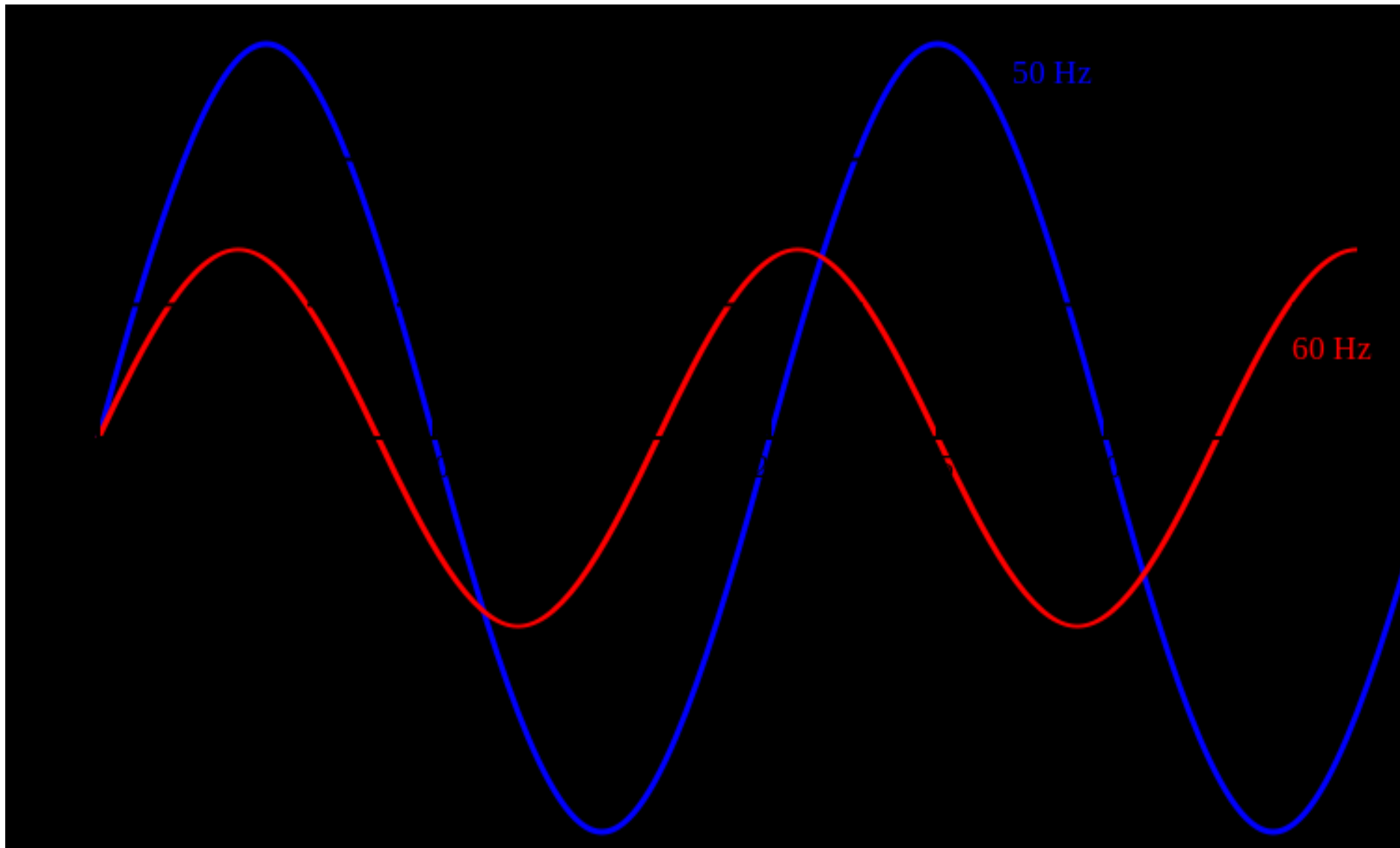
Villamos feszültség: a villamos tér két különböző pontjában fennálló **potenciál** (munkavégzőképesség) különbsége. Jele: U, u .
Mértékegysége: volt [V].

1 V a potenciálkülönbség (a feszültség) a villamos tér a és b pontja között, amikor 1 J (joule, ejtsd dzsul) munka szükséges 1 C töltés a-ból b-be való átviteléhez.

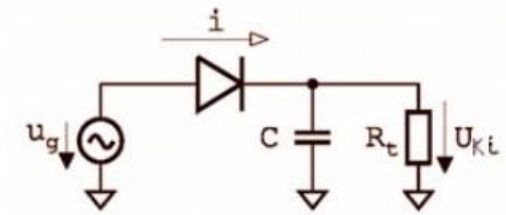
Képletben: $U [V] = W/Q [J/C]$.

A feszültséget a potenciálon lévő pont és egy önkényesen választott vonatkoztatási (referencia) pont (pl. a föld), vagy két különböző potenciálon lévő pont között mérjük.

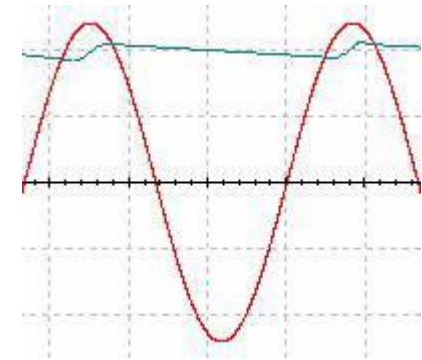
A **kék** görbe a 230 V, 50 Hz-es szinuszos feszültség jelalakja, a **piros** görbe a 120 V, 60 Hz-es szinuszos feszültségé.



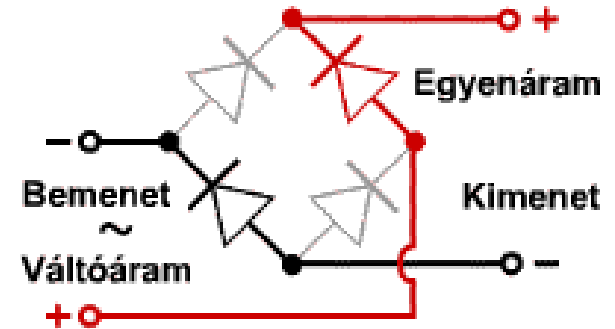
Ha az egyfázisú váltakozó áramú u_g generátor és az általa táplált R_t ellenállás közé egyenirányítót (diódát) kapcsolunk, áram csak minden pozitív félperiódusban folyik.



Ha R_t -vel párhuzamosan kapcsoljuk a C kondenzátort, akkor a pozitív félperiódusban az is töltődik. A negatív félperiódusban a dióda lezár. Ekkor a C kondenzátor az R_t ellenálláson keresztül kisül, így az R_t ellenállás árama viszonylag sima egyen-áram lesz (zöld vonal).

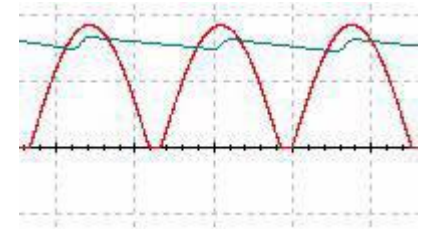


Használjuk most a Leo Graetz (1856-1941) által feltalált híd-kapcsolást! Ekkor a váltakozó feszültség pozitív félperiódusában a pirossal és feketével vastagon kihúzott diódák

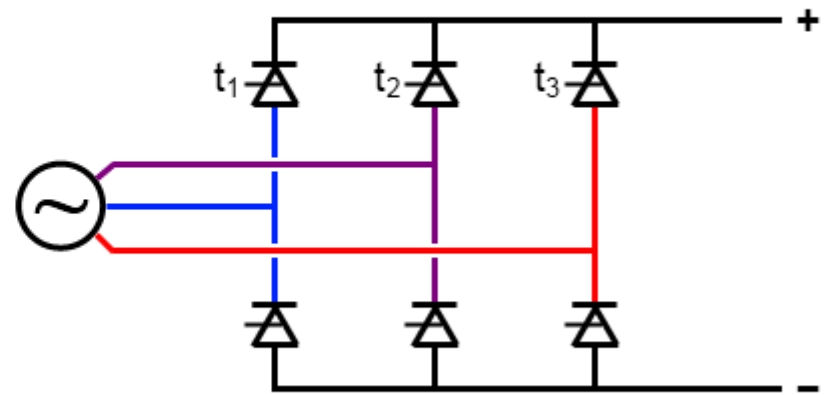
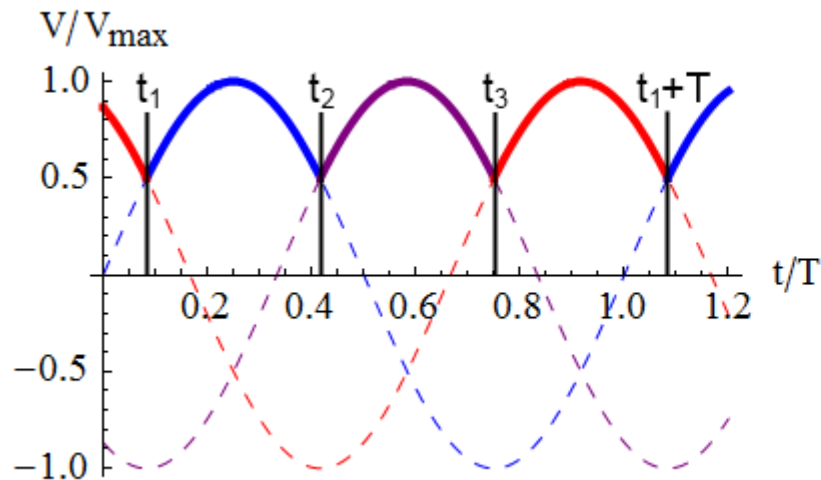


vezetnek és a szürkék lezárnak.

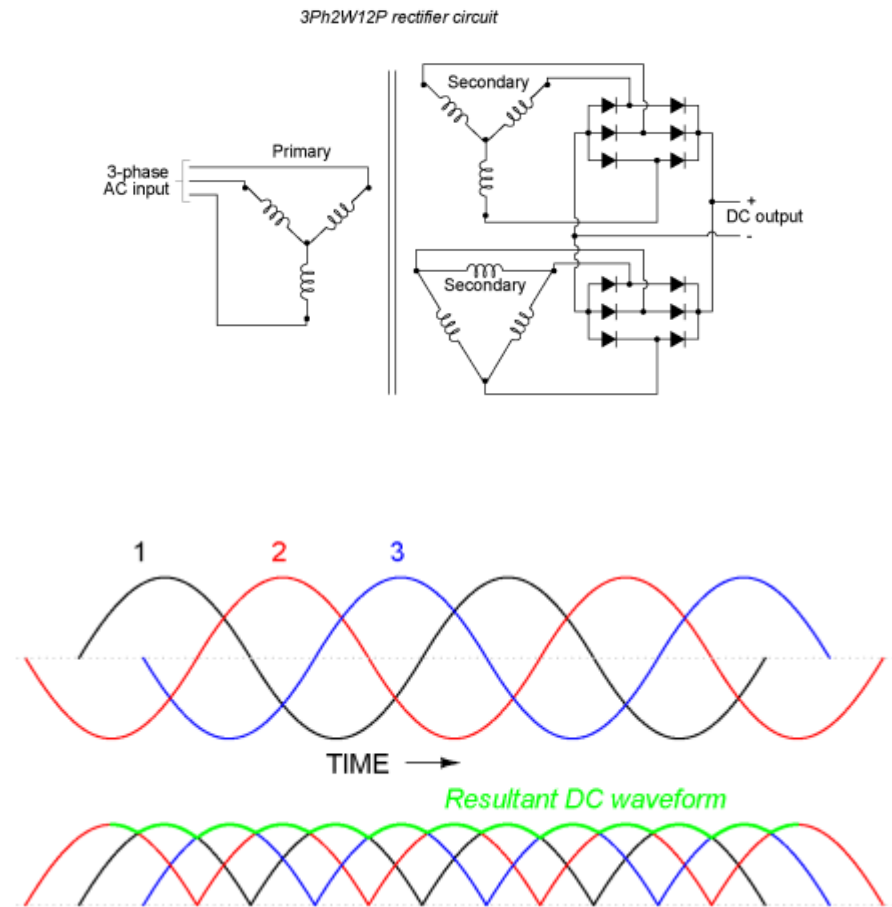
A negatív félperiódusban a szürkék vezetnek, a piros és a fekete lezár. Az egyenáramú kimenetre kapcsolt fogyasztón tehát mindkét félperiódusban folyik áram. Ha még az egyenáramú kimenettel párhuzamosan kondenzátort is kapcsolunk, akkor kisebb kapacitás esetén is viszonylag sima egyenáramot kapunk.



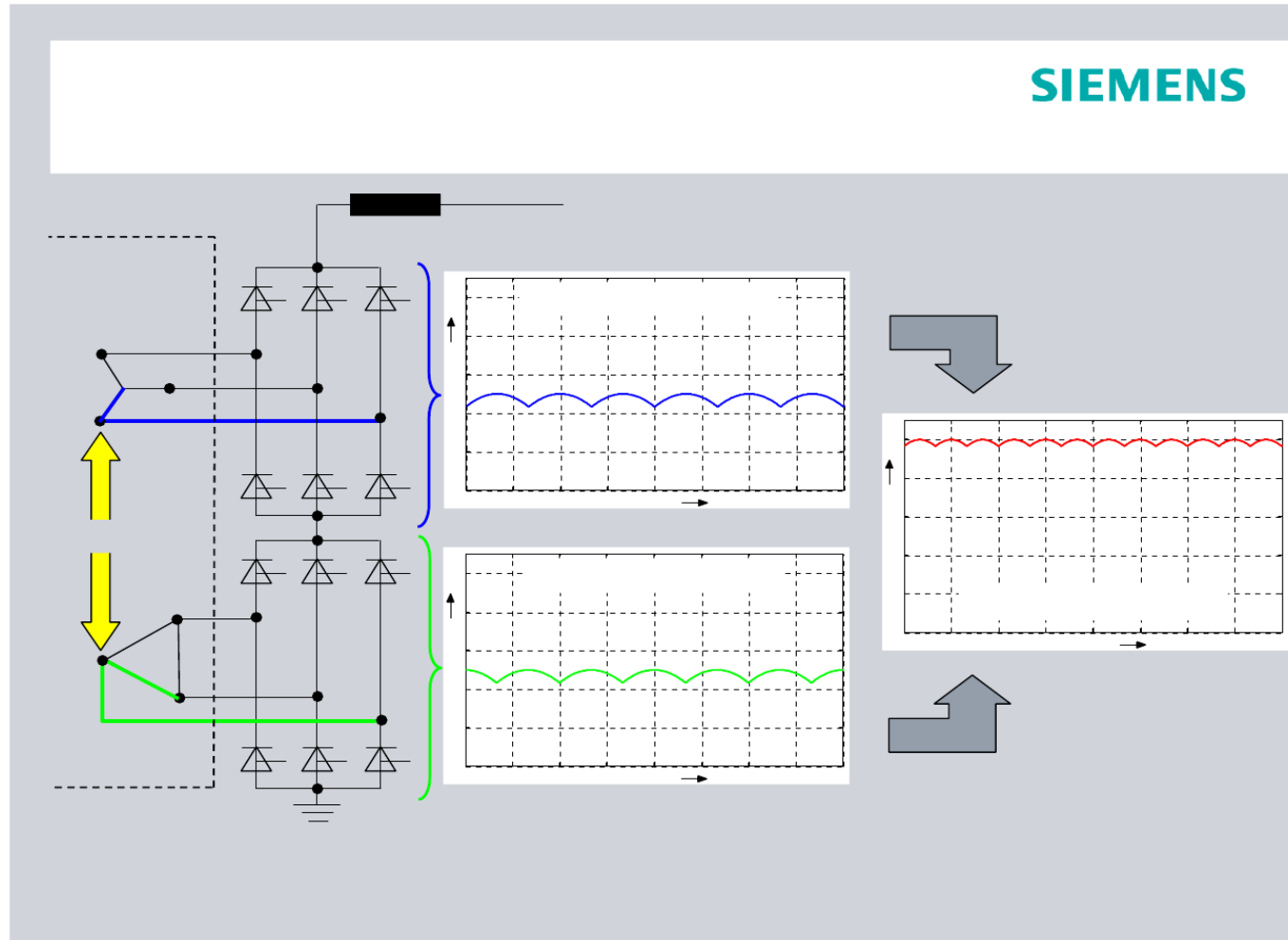
A nagyfeszültségű egyenáramú erőátvitel szempontjából a legfontosabb egyenirányító kapcsolás a háromfázisú hídkapcsolás, mert a háromfázisú táplálás következtében ennek (és az ebből származtatható) kapcsolásoknak van a legnagyobb gyakorlati jelentőségük. Megfelelő kapacitív és induktív simító elemekkel szinte teljesen sima egyenáram érhető el.



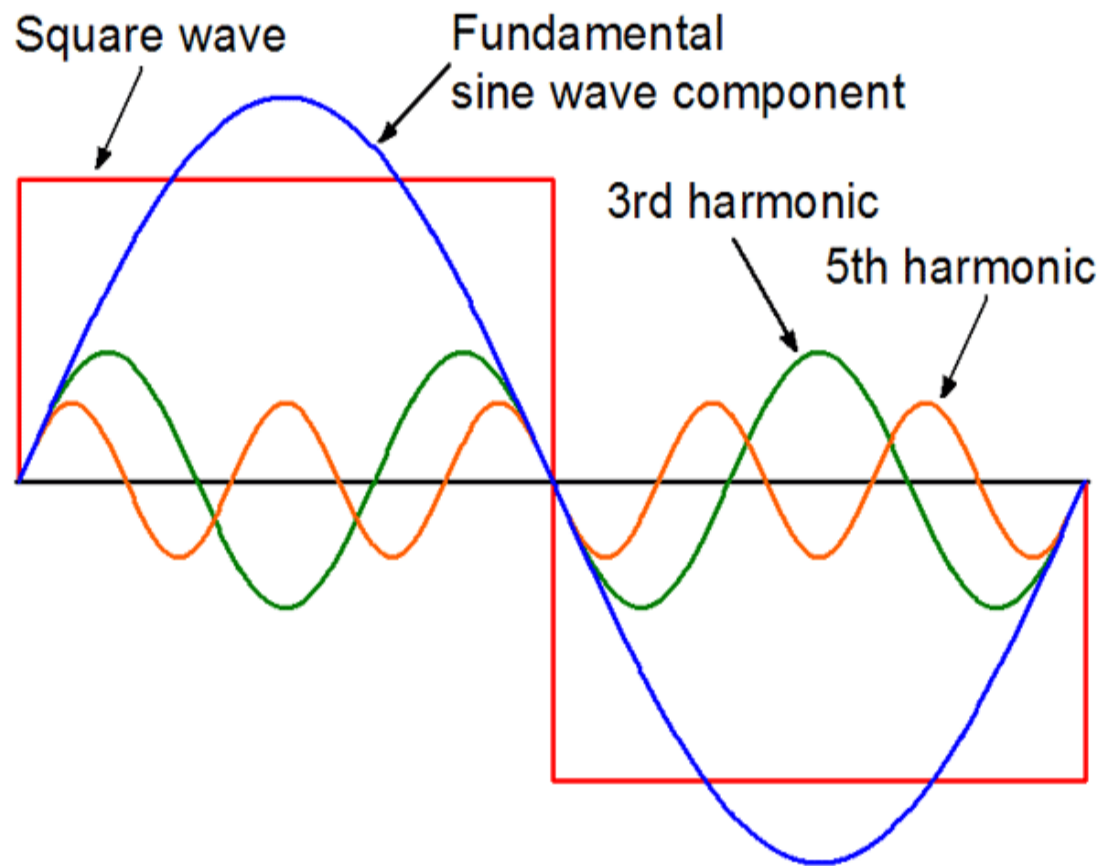
Ha a háromfázisú táptranszformátort két szekunder tekercsű és az egyik csillag, a másik delta kapcsolású, valamint a háromfázisú egyenirányító hidat is megkettőzzük, akkor előáll a leggyakrabban alkalmazott **háromfázisú, kétutas, 12 ütemű** kapcsolás (a szokás szerinti angol nyelvű kódolással **3Ph[ase]2W[ay]12P[ulse]**), amely már majdnem sima egyenáramot ad.



Hogyan hozzák létre 2 db háromfázisú, kétutas, 6 ütemű, hídkapcsolású egyenirányítóval a 12 ütemű, már alig hullámos egyenáramot? Úgy, hogy a párhuzamosan járó transzformátorok egyikének szekundere csillag-, a másikénak 30 villamos fokkal eltolt delta kapcsolású.



Invertáláskor a sima egyen-
áramot a **tirisztorok vezérlé-
sével** a kívánt frekvenciájú
periodikus, váltakozó
négyszög-árammá alakítják,
majd szűrőkörökkel eltávo-
lítják a felharmónikusokat, így
megmarad a tiszta alap-
harmónikus áram.



Az igen nagy feszültségű HVDC berendezések 7500 A névleges áramú, 1,02 V soros feszültségesésű, 1200 V zárófeszültségű tirisztorai



A HVDC előnyeit és hátrányait időállóan foglalta össze Edward Wilson **Kimbark** (1902-1982) a szakmában alapműnek számító, 1971-ben megjelent **Direct Current Transmission** c. könyvében.

Előnyök:

1. Nagyobb az áramvezetőkénti átvihető teljesítmény.
2. A DC szabadvezeték szerkezete egyszerűbb, mint az AC vezetéké; kisebb a nyomvonal szélessége, egyszerűbb, tetszetősebb az oszlop.
3. A föld használható üzemi áram-visszavezetőként.
4. Következésképp minden egyes szigetelt áramvezető külön áramkört tud képezni.
5. Nincs kapacitív töltőáram.
6. Nincs skin-hatás (azaz az áramvezető egyenáramú ohmos ellenállása kisebb, mint a váltakozó áramú).
7. Az egyenáramú kábelek nagyobb feszültség-gradienssel üzemelhetnek.
8. Az egyenáramú távvezeték teljesítmény-tényezője mindig egységnyi, azaz nincs meddőteljesítmény, csak hatásos.

9. Kisebb a koronasugárzási veszteség és a rádió-interferencia, mert az áramvezető körüli állandósult tértöltés virtuális átmérőnövekedést okoz.
10. Nem szükséges, hogy az egyenáramú távvezeték végponti alállomá-sai szinkronban legyenek egymással.
11. Következésképp a távvezeték hosszát nem korlátozza a stabilitás.
12. Aszinkron üzemelő vagy különböző névleges frekvenciájú VER-ek vagy VERE-k összekapcsolhatók.
13. Az egyenáramú távvezeték rövidzárlati áramai kisebbek, mint a válto-kozó áramúé.
14. A váltakozó áramú villamosenergia-rendszer perturbációit (pl. zárlat-tait, lengéseit) sem az egyenirányító, sem az inverter nem engedi át (tűzfal), azaz a velük összekapcsolt váltakozó áramú rendszerek nem tudják megnövelni egymás zárlati teljesítményét.
15. Az egyenáramú összeköttetésen keresztül áramló teljesítmény könny-en szabályozható.
16. Adott szigetelés (pl. léghöz, kábel érszigetelése) $\sqrt{2}$ -ször nagyobb feszültséget bír el.
17. A DC kábelösszeköttetés hossza többszöröse lehet az AC-ének.

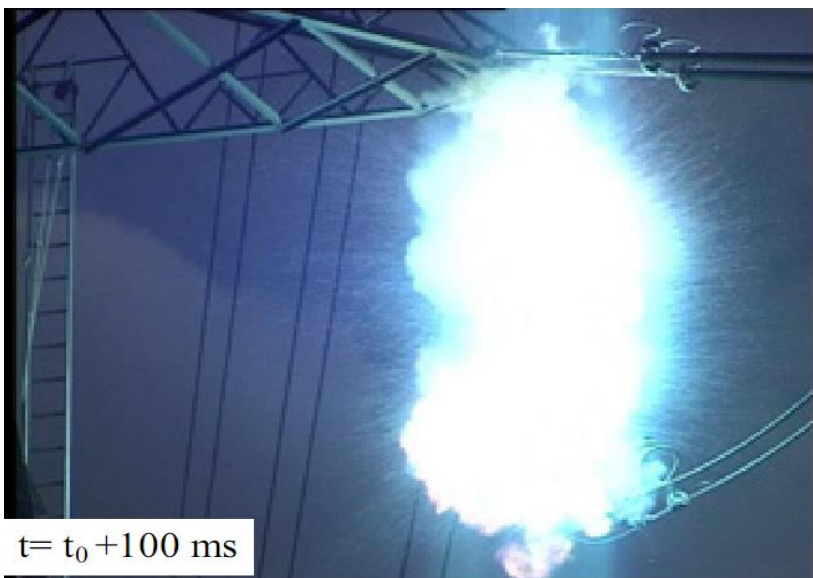
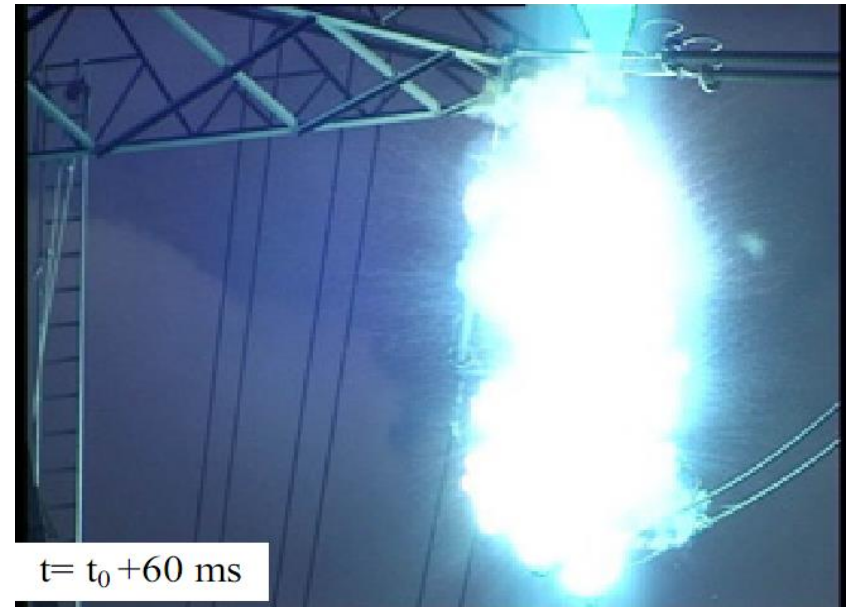
Végeredményben tehát **nagy mennyiségű (5-15 GW) villamos teljesítmény nagy távolságra (2-3000 km-re) olcsóbban** (kisebb beruházási és veszteségekkel) **szállítható HVDC-vel**, mint HVAC-vel.

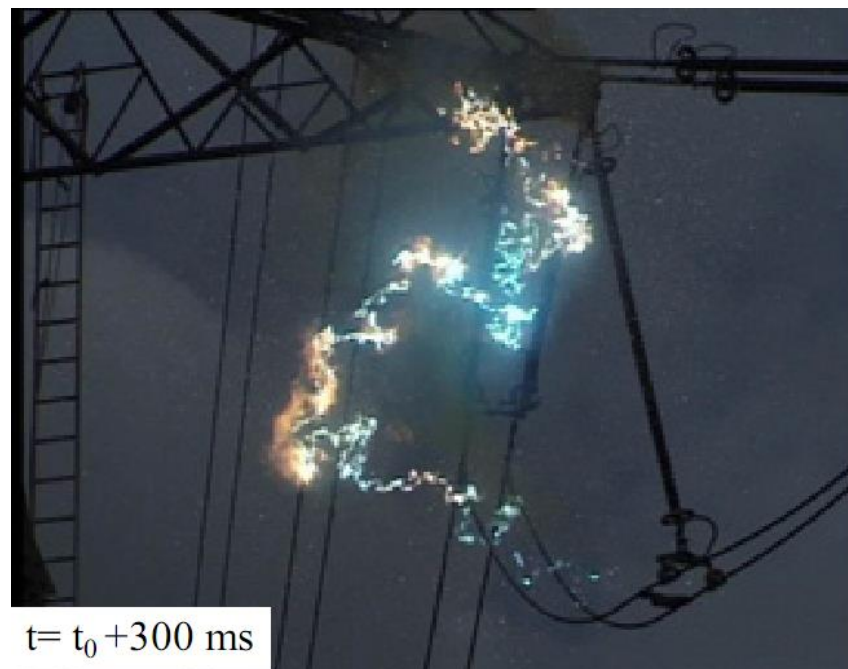
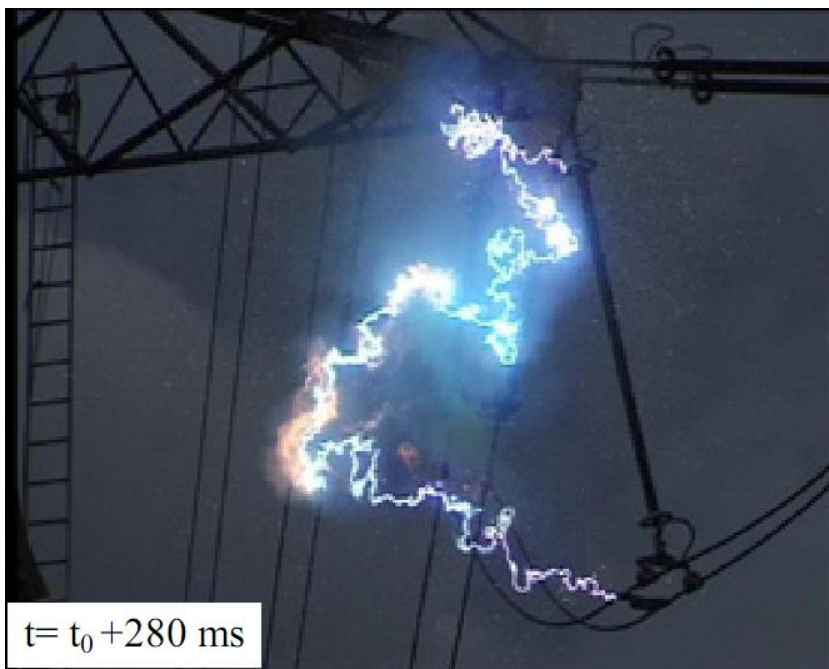
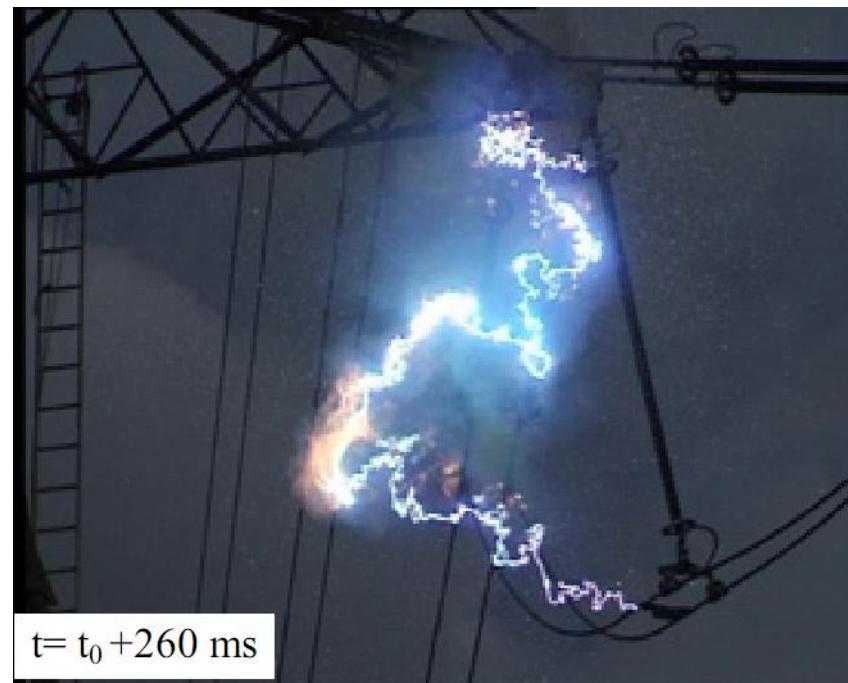
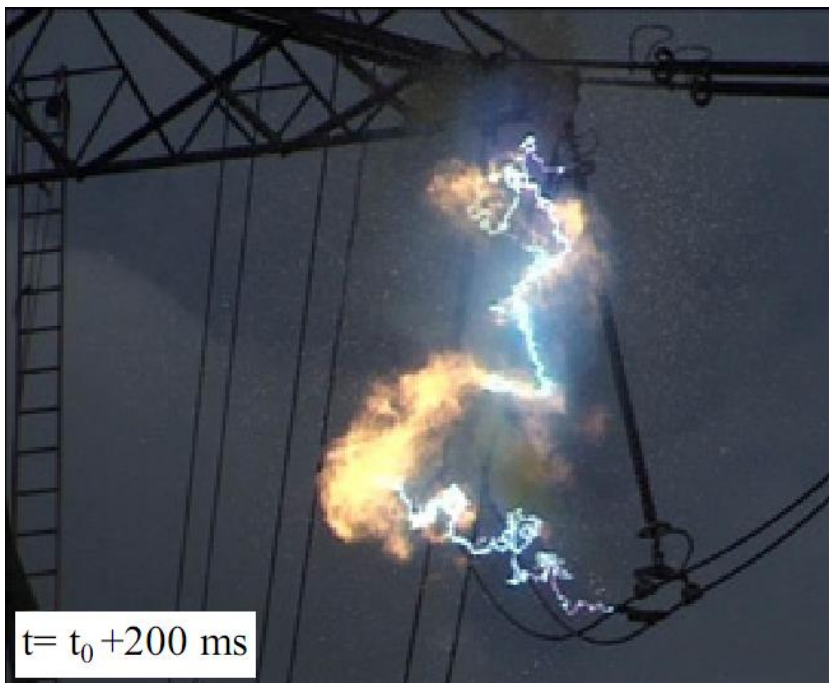
Hátrányok:

1. Az áramirányítók drágák.
2. Az áramirányítók jelentős meddő teljesítményt igényelnek, amelyet a konverter állomásokon kell előállítani.
3. Az áramirányítók felharmónikusokat termelnek, ezért szűrőkörökre van szükség.
4. Az áramirányítókat kevésbé és sokkal rövidebb ideig lehet túlterhelni, mint a váltakozó áramú kapcsolóberendezéseket.
5. Mivel nem létezik nagyfeszültségű egyenáramú megszakító, ez akadályozza többvégpontú (multiterminális) vagy hálózatos alakzatok létrehozását. **(Ez a Kimbark-könyv írásakor, 1971-ben még így volt; ma már [2012 óta] léteznek félvezető és kombinált HVDC megszakítók, tehát létesíthetők többvégpontú HVDC alakzatok.)**
6. Földvisszavezetétes monopólusú üzemben elektrokémiai korrózió lép fel, amely kikezdi a fém csővezetékeket; az ez elleni védekezés költségnövelő.

Kimbark tevékenységének magyar vonatkozása is van: 750 kV-os távvezetékünk 1FN íves rövidzárlatainak mindkét végponti egyfázisú kikapcsolása után a zárlati helyen fennmaradó kapacitív áramú szekunder ív égési időtartamát az ő elgondolása alapján a távvezeték 750 kV-os söntfojtójának csillagpontja és a föld közé beiktatott zérus sorrendű fojtó (induktivitás) kompenzáló hatása rövidíti le 2-3 s-ról 0,2-0,3 s-ra, azaz 1 nagyságrenddel nő az EVA (egyfázisú visszakapcsoló automatika) sikerességének esélye.

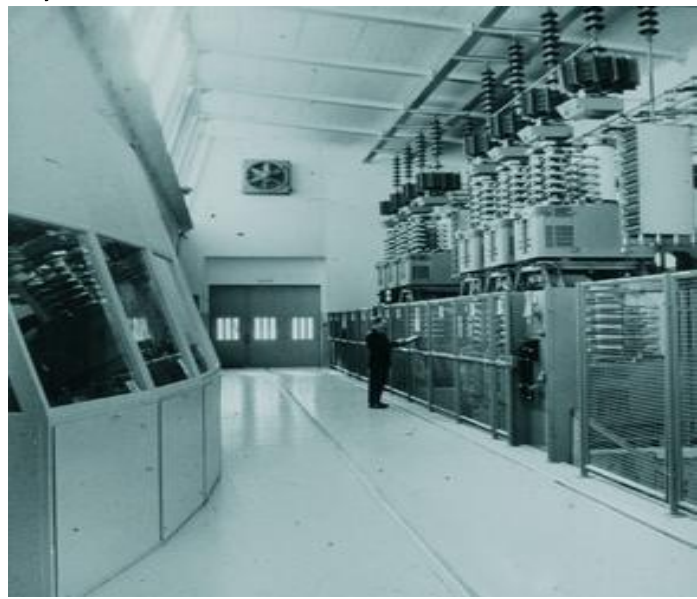
Egy 400 kV-os távvezeték mesterséges – ún. behúzásos – 1FN zárlatának sorozatfelvételei. Az 1-3. képeken a primer zárlati ív, a 4-8. képeken a szekunder ív látható.





A HVDC-k mintavételes 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-áramirányítós 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 fogadóállomással, amely még higanygőz egyen- és váltóirányítókkal létesült.



Mozambik legnagyobb folyóján, a bővizű Zambezin, az indiai-óceáni torkolattól kb. 1000 km-re épült a **Cabora Bassa** vízerőmű. Tározójának legnagyobb hosszúsága 292 km, legnagyobb szélessége 38 km, területe 2739 km² (4,5-szer nagyobb, mint a Balaton), víztérfogata 55,8 km³, legnagyobb mélysége 157 m. A gát a kép jobb szélén van.



A közel 300 km hosszú tározó a partnak mindössze két pontján közelíthető meg közúti járművel, így a Zambéziiben és környékén honos vadak háborítatlanul, szabadon élhetnek.

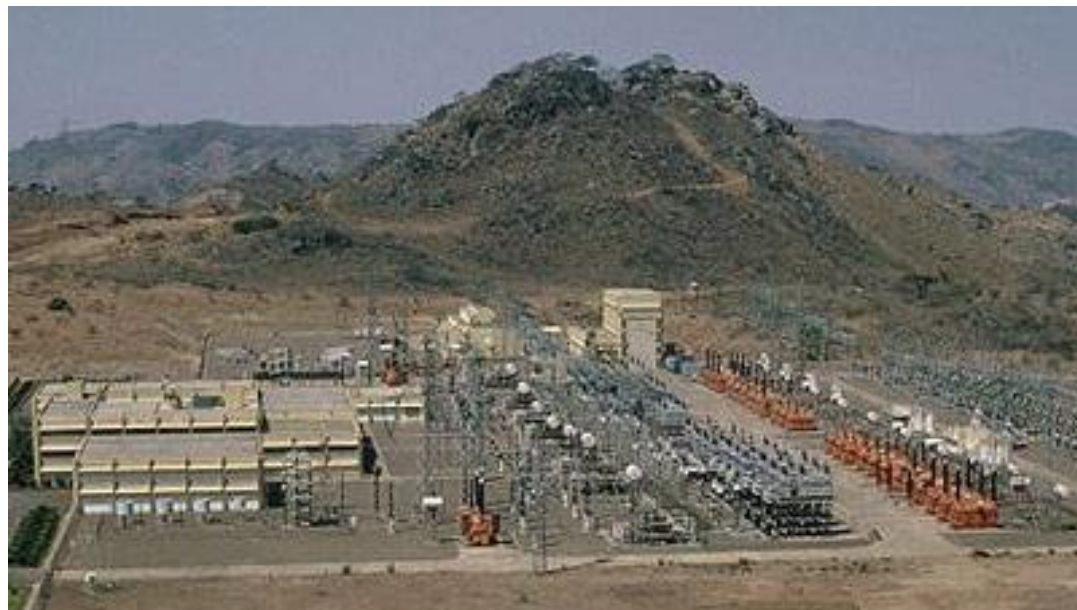


Az ötgépes Cabora Bassa erőmű összteljesítménye $5 \times 415 = 2075$ MW.
A gát látképe a felvíz felől (baloldalt) és az alvíz felől (jobbaldalt).



Az erőmű alállomásának fő berendezése a 400 kV-os váltakozó áramot ± 533 kV-os egyenárammá átalakító konverter (a felső ábrán középen), melynek tirisztorai szabadtéri elhelyezésűek (szemben az újabb létesítményekkel, melyeknél a tirisztorok zárt csarnokokban vannak).

A felső kép jobb oldalán és az alsó képen láthatók az egyenirányítókat tápláló transzformátorok.





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.

Földvezetéke a kb. 2000 km hosszban elnyúló, mintegy 150 m vastag fekete-szén-mező, melybe csak le kellett fúrni.

Az 1980-as évek elején, a mozambiki polgárháborúban 4200 oszlopa megsemmisült vagy súlyosan megrongálódott. 1998-ra állították helyre.



A dél-afrikai Apollo alállomás váltóirányító berendezése.

A kép előterében látható sorba kapcsolt kompenzáló berendezések egyre magasabb támszigetelőkre vannak állítva, a földhöz képesti növekvő potenciáljuknak megfelelően.



Meglévő (piros), épülő (zöld) és tervezett (kék) nagyfeszültségű, egyenáramú kábelösszeköttetések Európában.

The European supergrid



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.



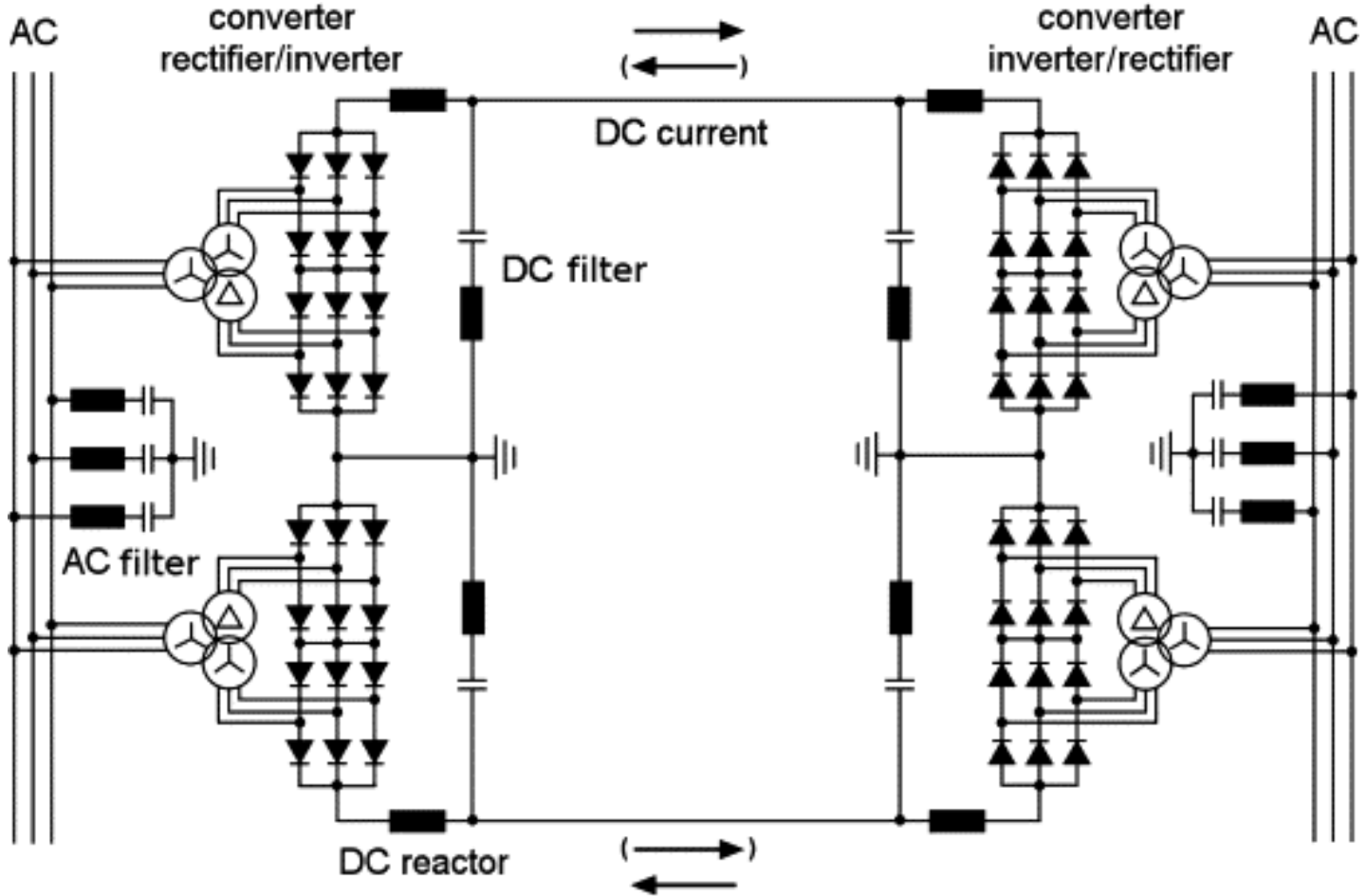
Árokásó és kábelfektető robotgép tenger alatti HVDC kábelhez



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

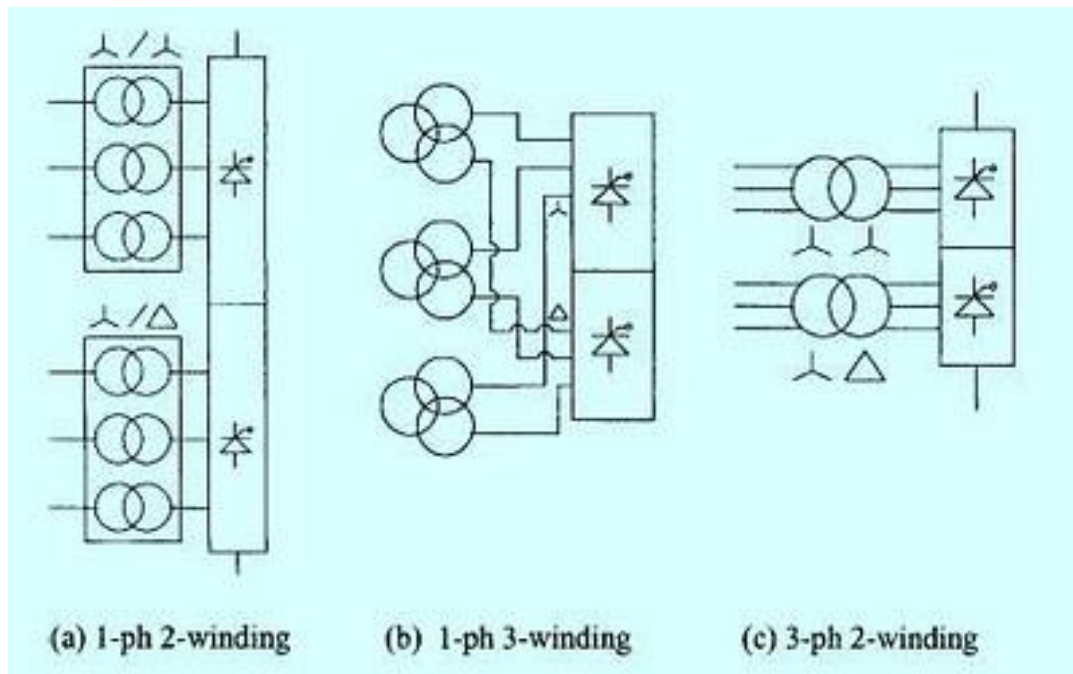


Korszerű bipoláris, nagyfeszültségű, váltakozó – egyen – váltakozó áramú összeköttetés sémája. A háromfázisú, kétutas, 12 ütemű hidat megkettőzve hibatűrő kapcsolást kapunk: az egyik híd és a hozzá tartozó berendezés üzemzavara esetén a megmaradó séma – pl. a pozitív pólus és a föld, vagy a föld és a negatív pólus – átviszi a fele teljesítményt.



Az egyen- és váltóirányítókhoz csatlakozó **transzformátorok szokásos konfigurációi:**

- (a) Egyfázisú, kéttekerceselésű transzformátorokból összeállított 2 db háromfázisú csoport, az egyik szekundere csillag, a másiké delta kapcsolású.
- (b) Egyfázisú, háromtekerceselésű 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.



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



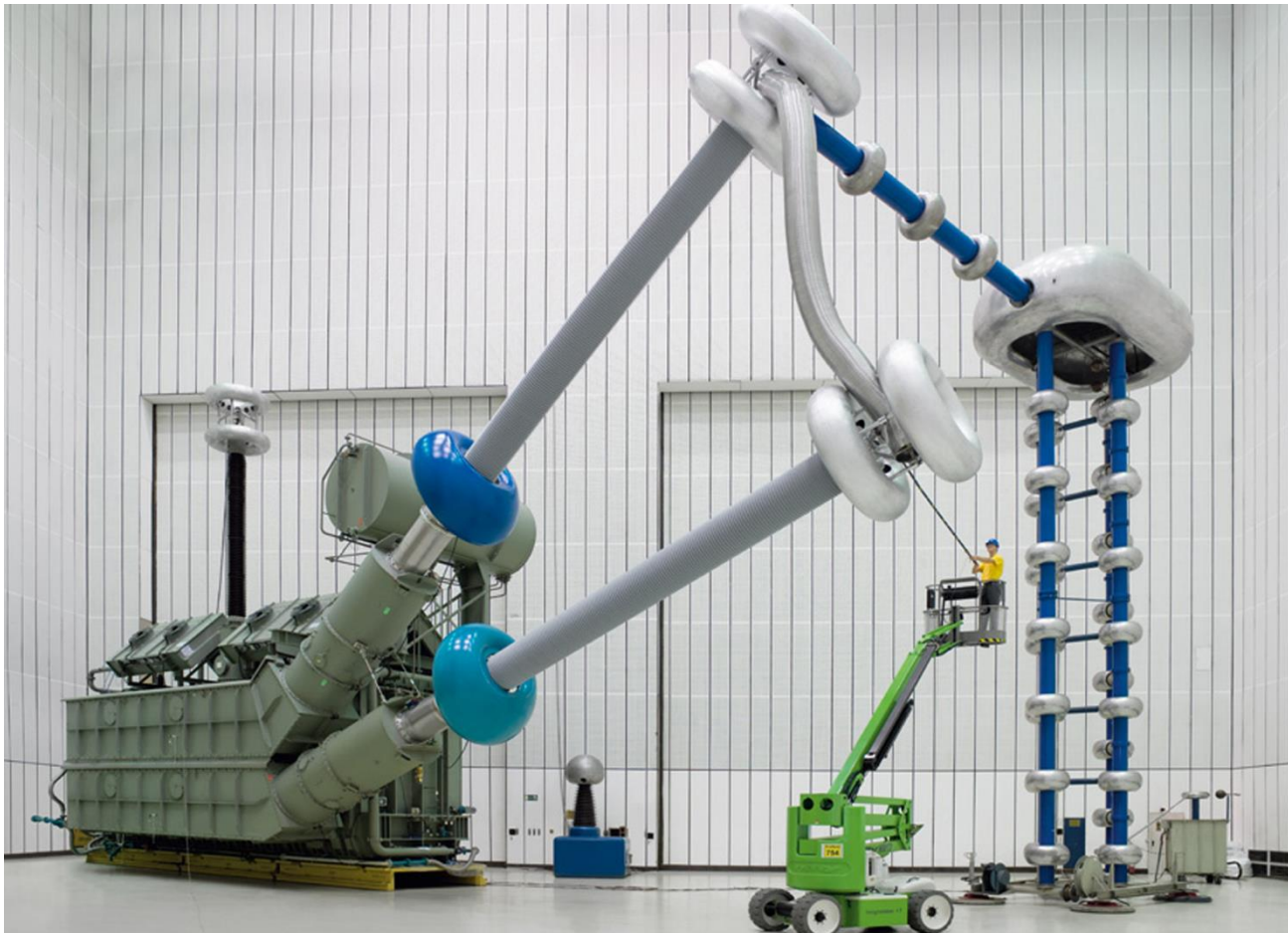
A (b) kapcsolás szerinti egyfázisú, egy $500/\sqrt{3}$ kV-os primer és két 800 kV-os szekunder tekercsű transzformátor a kínai Yunnan-Guangdong 1438 km-es, ± 800 kV-os, 5000 MW-os egyenáramú átvitel egyenirányítóihoz és invertereihez való csatlakozásra. Balra a delta, jobbra a csillag kapcsolású szekunder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



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



Az (a) kapcsolás szerinti egyfázisú, kétkercesű, csillag/delta kapcsolású Siemens transzformátor, a Yunnan-Guangdong 1438 km-es, ± 800 kV-os, 5000 MW-os egyenáramú átvitel egyenirányítóihoz és invertereikhez való csatlakozásra. Háttérben a primer tekercs $500/\sqrt{3}$ kV-os szabadtéri kivitelű, ernyős átvezető-szigetelője, előtérben a 800 kV-os szekunder tekercs 14 m-es kompozit átvezetői.



A ± 800 kV-os HVDC összeköttetés transzformátorának szekunder tekercséhez tartozó 14 m hosszú kompozit átvezető szigetelő.



A Yunnan-Guangdong ± 800 kV-os, 5000 MW-os egyenáramú összekötés egyenirányító-csarnoka, a kettőzött háromfázisú, kétutas, 12 ütemű egyenirányító 6 db függesztett, földrengésbiztos tirisztor-csoportjával. Balra az egyfázisú, kétkercses transzformátorok benyúló kompozit átvezetői; elől a 3×2 csillag tekercsvégé, hátul a 3×2 Δ -é.



Előli a csillag kapcsolású tekercsek átvezető-szigetelői, hátul a delta kapcsolásúaké.



A Yunnan-Guangdong ± 800 kV-os, 5000 MW-os egyenáramú összeköttetés kettőzött háromfázisú, kétutas, 12 ütemű egyenirányítójának 6 db függesztett, földrengésbiztos tirisztor-csoportja. A tirisztorok vízhűtésűek, optikai kábeles gyűjtésvezérlésűek. Balra alul az egyfázisú táptranszformátorok delta kapcsolású tekercsének kompozit átvezető-szigetelői.



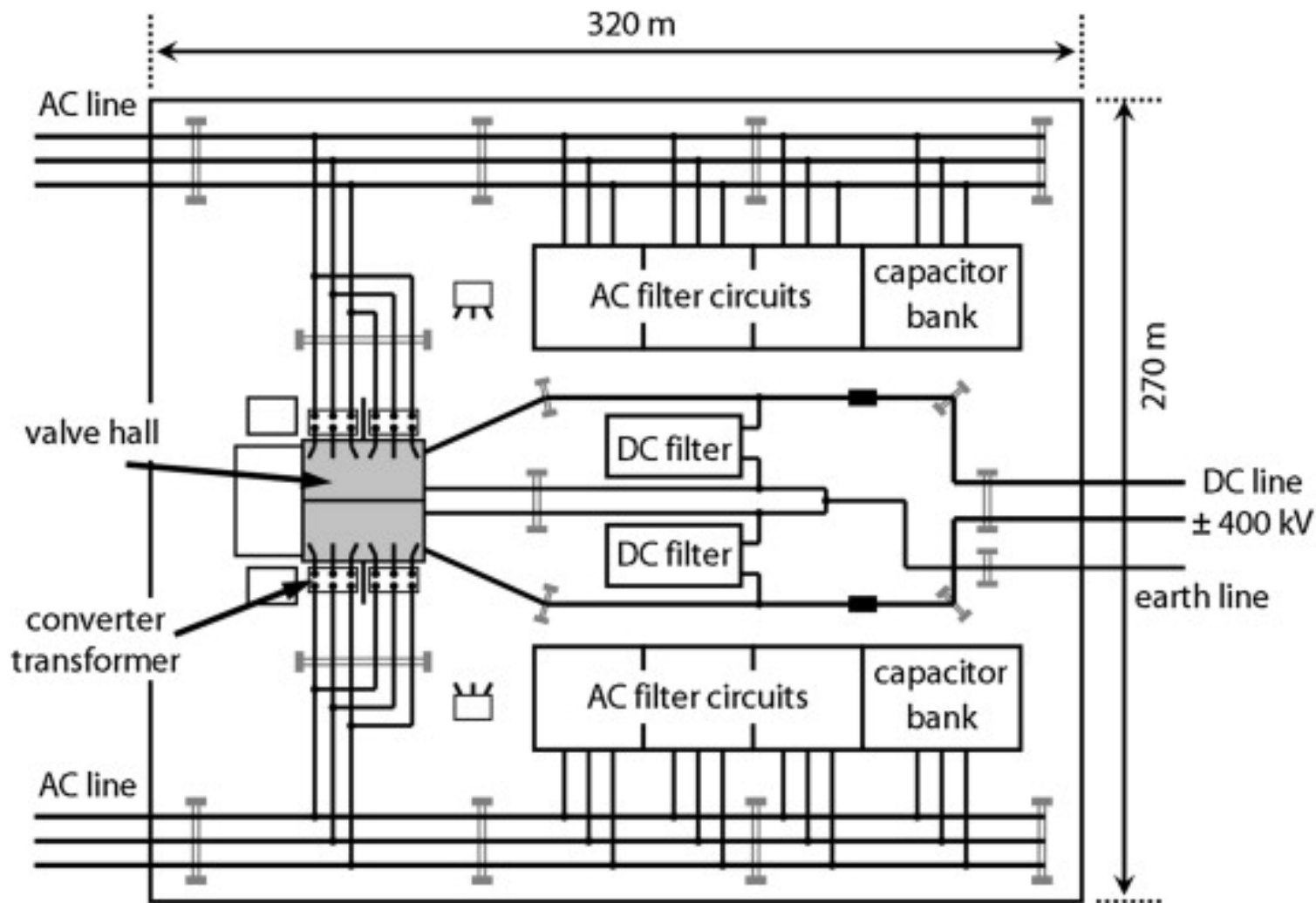
A 2000 km-es Xiangjiaba-Shanghai ± 800 kV-os, 6400 MW-os egyenáramú átvitel függesztett, földrengésbiztos tirisztorcsoportjai.



Ugyanaz a berendezés alulnézetből; jól kivehető a koronasugárzást kiküszöbölő csőszerű burkolattal árnyékolt sodronysínezés



HVDC konverter-alállomás tipikus elrendezése. A diszpozíció a vízszintes tengelyre szimmetrikus, annak megfelelően, hogy a berendezés a pozitív pólus és a föld, valamint a föld és a negatív pólus között – fele teljesítménnyel, de egyébként azonos jellemzőkkel – üzemben tartható.



±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.



A kínai ± 800 kV-os, 5-7000 MW átviteli kapacitású egyenáramú távvezetékek jellemző nyomvonalala



A kínai ± 800 kV-os egyenáramú távvezeték jellemző saroktartó oszlopa



Nyolcas kötegű áramvezetőt feszítő 800 kV-os kettős feszítőlánc ívvédő szerelvényének igazítása (balra).

Hatos tartólánc által függesztett négyes kötegű áramvezető beszállítása 800 kV-os folyamkeresztező tartóoszlopon (jobbra).



A seejthető jövő

± 1100 kV-os egyenáramú távvezeték kísérleti szakasza a kínai próba-állomáson



Rugalmas, rezgéscsillapító betétű távolságtartó szerelésének gyakorlása laboratóriumban, nyolcas kötegű áramvezetőn (Kína)



A tervezett kínai ± 1100 kV-os egyenáramú összeköttetés konverter állomásának hazai gyártású simító fojtója



Új fejlemények a modern HVDC technikában:

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

2. Mivel az off-shore szélparkok a tengerpartoktól egyre távolabbra „mérészkednek”, nemsokára elérik azt a távolságot, amelynél a váltakozó áramú tengeralatti erőátviteli kábel kapacitív töltőárama eléri a kábel termikus határáramát, így abba már semmi wattos áram „nem fér bele”. Ez – ha veszteségcsökkentési érvek nem lennének is – kikényszerítené az MVDC vagy HVDC kábelek alkalmazását.

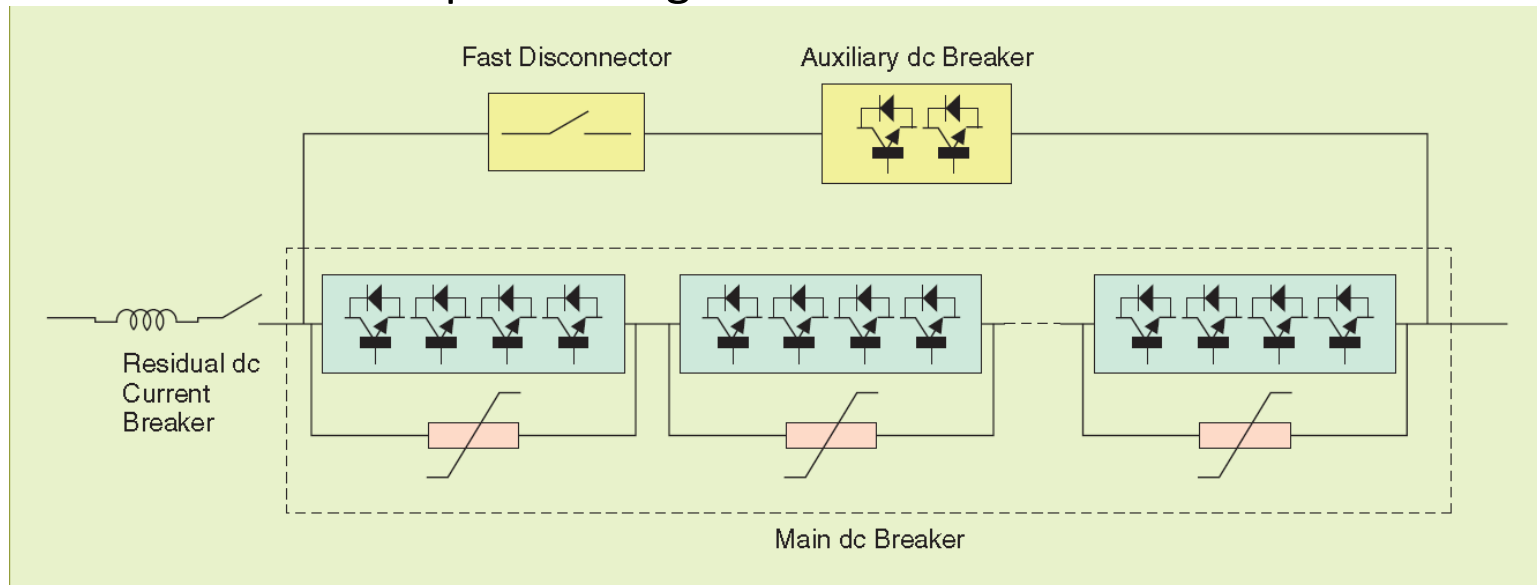
3. Az új áramtermelési technikák egy része (üzemanyag-cella, fotovoltai-ka) eleve egyenáramot állít elő.

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

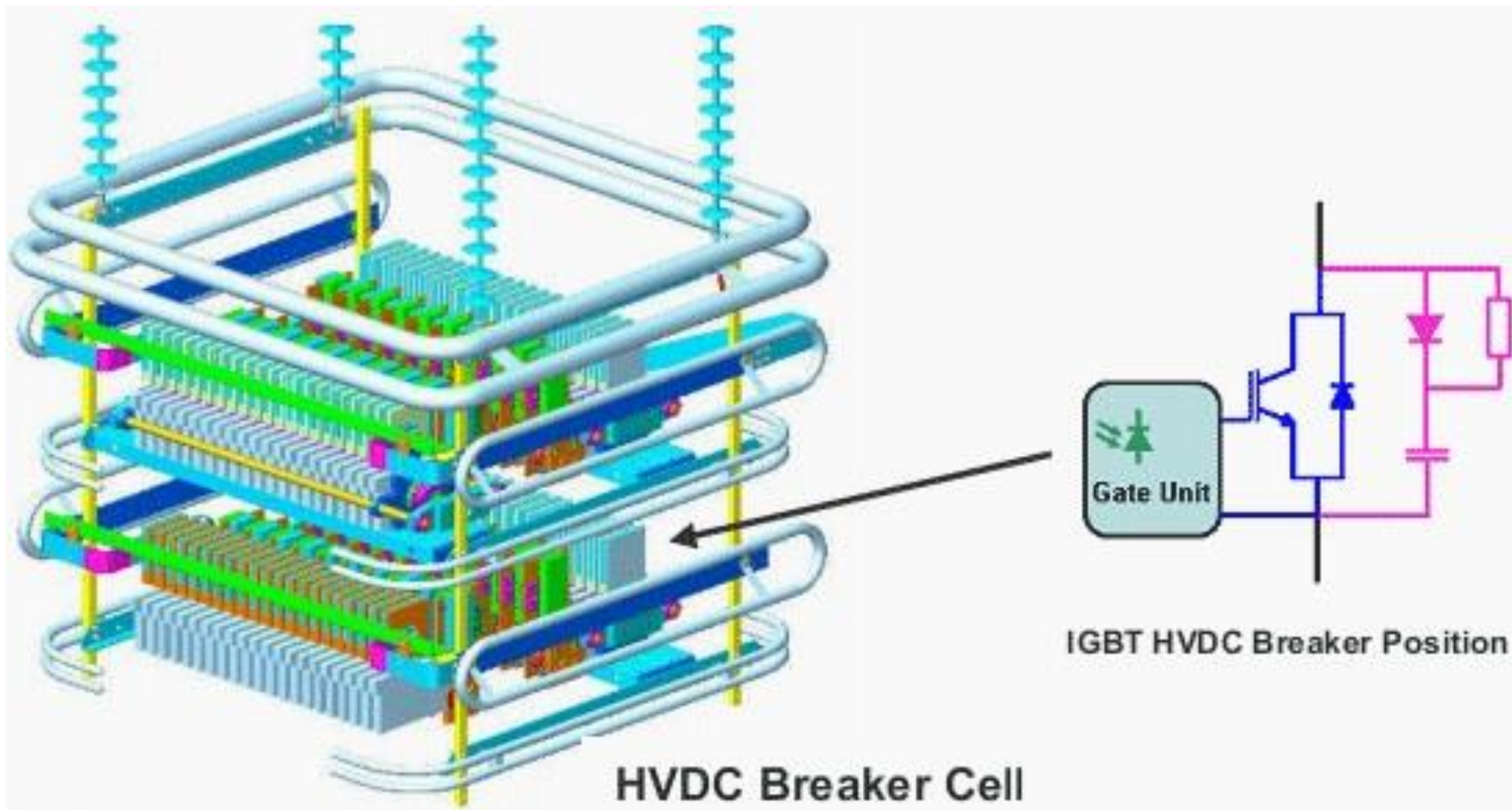
Ezeket a kihívásokat a jövő villamosmérnökeinek ismerniük kell!

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

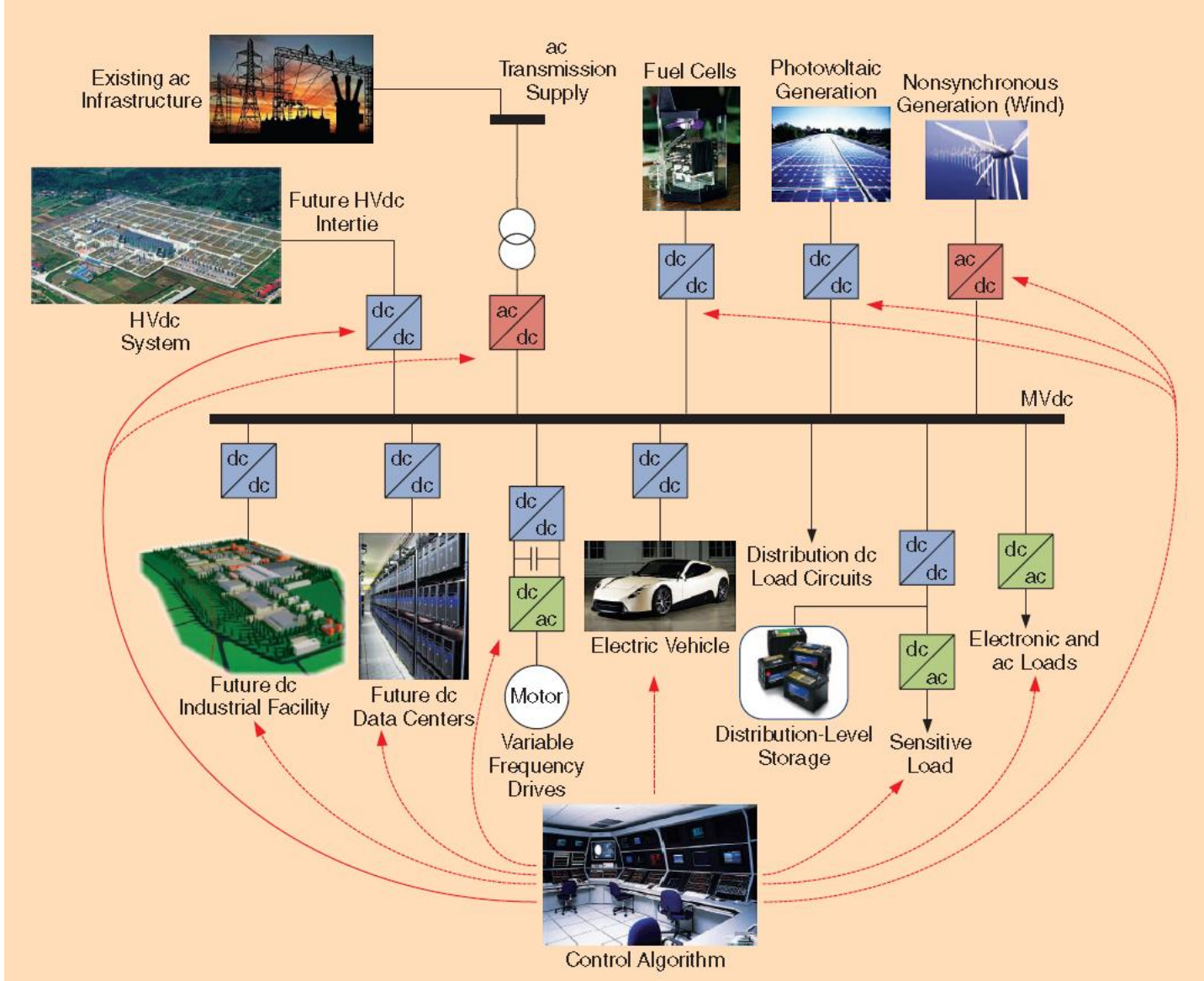
1. Üzemszerűen a sárga áramkör (a kevés félvezető elemből álló, ezért kis ohmos ellenállású, kis veszteségű segéd dc megszakító és a vele sorba kapcsolt igen gyors mechanikus szakaszoló) vezeti a több kA-es egyenáramot.
2. Szándékolt vagy védelmi „ki” parancsra lezár a segéd dc megszakító, majd miután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



Egy elképzelés a HVDC hibrid megszakító megvalósításáról: az egyen- és váltóirányító tirisztorokéval azonos, függesztett szerkezetben tervezik elhelyezni a fő dc megszakító sok-sok sorba kapcsolt elemét, a vezérlő és a túlfeszültségvédelmi áramkörökkel együtt.



A jövőbeni közepesfeszültségű egyenáramú (MVDC) elosztóhálózat egy lehetséges sémája: a gyűjtősín-szerű csomópont felett a betáplálások a szükséges áramnem- (ac/dc) és feszültség szint- (dc/dc) váltókkal, alatta az ac és dc fogyasztói csoportok.



A decentralizált áramtermelés újabb példája a BAT(buoyant airborne turbine – lebegő szélturbina): egymástól távoli kis települések, kis szigetek, katasztrófasújtott területek dc vagy ac ellátására. A héliummal töltött, uv-sugárzásnak és szélviharoknak ellenálló ballont a földről áramlevezető kábelekkel horgonyozzák ki, és engedik fel 200-400 m magasba, ahol a szélesség a felszíninek többszöröse. Ez a példány Alaszkában működik, teljesítménye 18 kW.



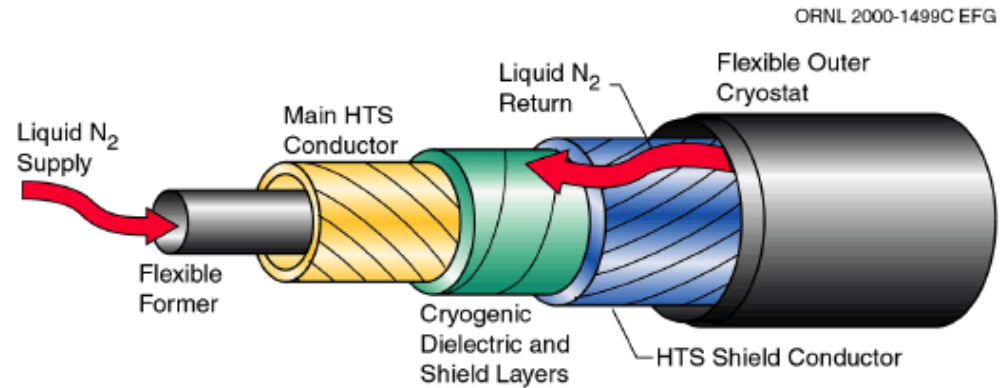
És lehet, hogy az előzőekben tárgyalt nagy- és igen nagy feszültségű berendezések és eszközök feleslegessé válnak, ha az USA-beli Long Island Power Authority-nak a képen látható, 2008-ban üzembe helyezett nagyhőmérsékletű szupravezető kábele (138 kV AC, 574 MW \rightarrow 2400 A(!)) és utódai széleskörű ipari alkalmazást nyernek.



Folyékony, 77,3 K-nél hidegebb nitrogénnel hűtött nagyhőmérsékletű szupravezető (HTS – high temperature superconductive) kábel felépítése és fényképe.

Mivel a szupravezető egyenáramú kábel áramvezetőjének fajlagos konduktív ellenállása nanoohm \times mm²/m nagyságrendű, adott teljesítmény átviteléhez akár tízszeres áram, azaz tizedakkora feszültség tartozhat. Pl. 100 MW teljesítmény 120 kV helyett akár 10 kV-on is szállítható!

Vigyázat! Azért ne siessük el az áttérést a nagyfeszültségű, váltakozó áramú távvezetésekről a közepfeszültségű szupravezető kábelekre, mert az előbbiek alkotják azt a többszintes hálózatot, amellyel a fogyasztókat ellátják.







Összefoglaló műszaki-gazdasági értékelés

Kínai számítások szerint 10 000 MW teljesítmény 3000 km-re történő szállításához a különböző nagy- és ultranagy 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.

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 %

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

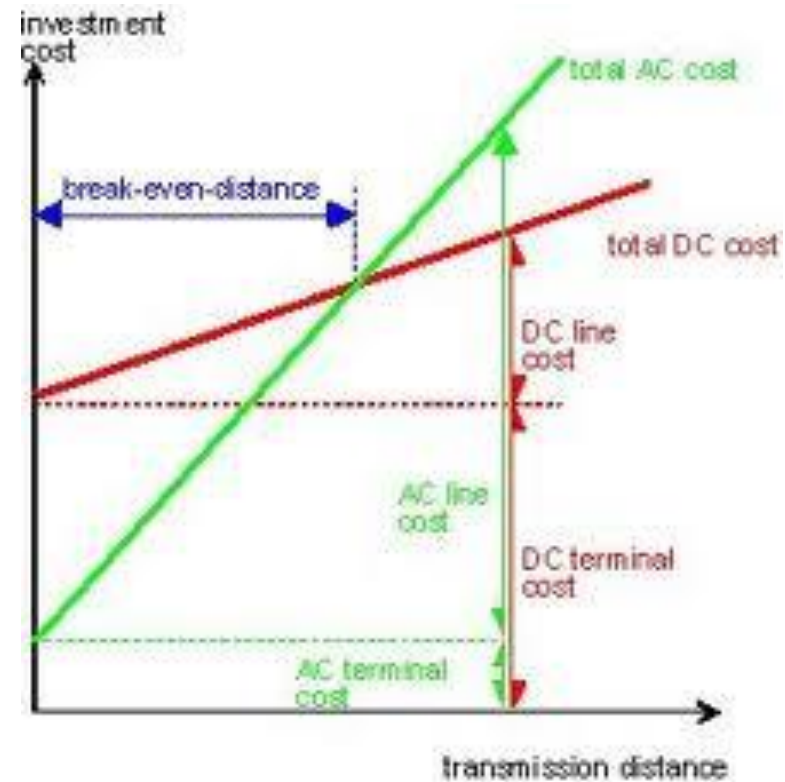
AC: olcsó végpontok – drága távvezeték

DC: drága végpontok – olcsó távvezeték

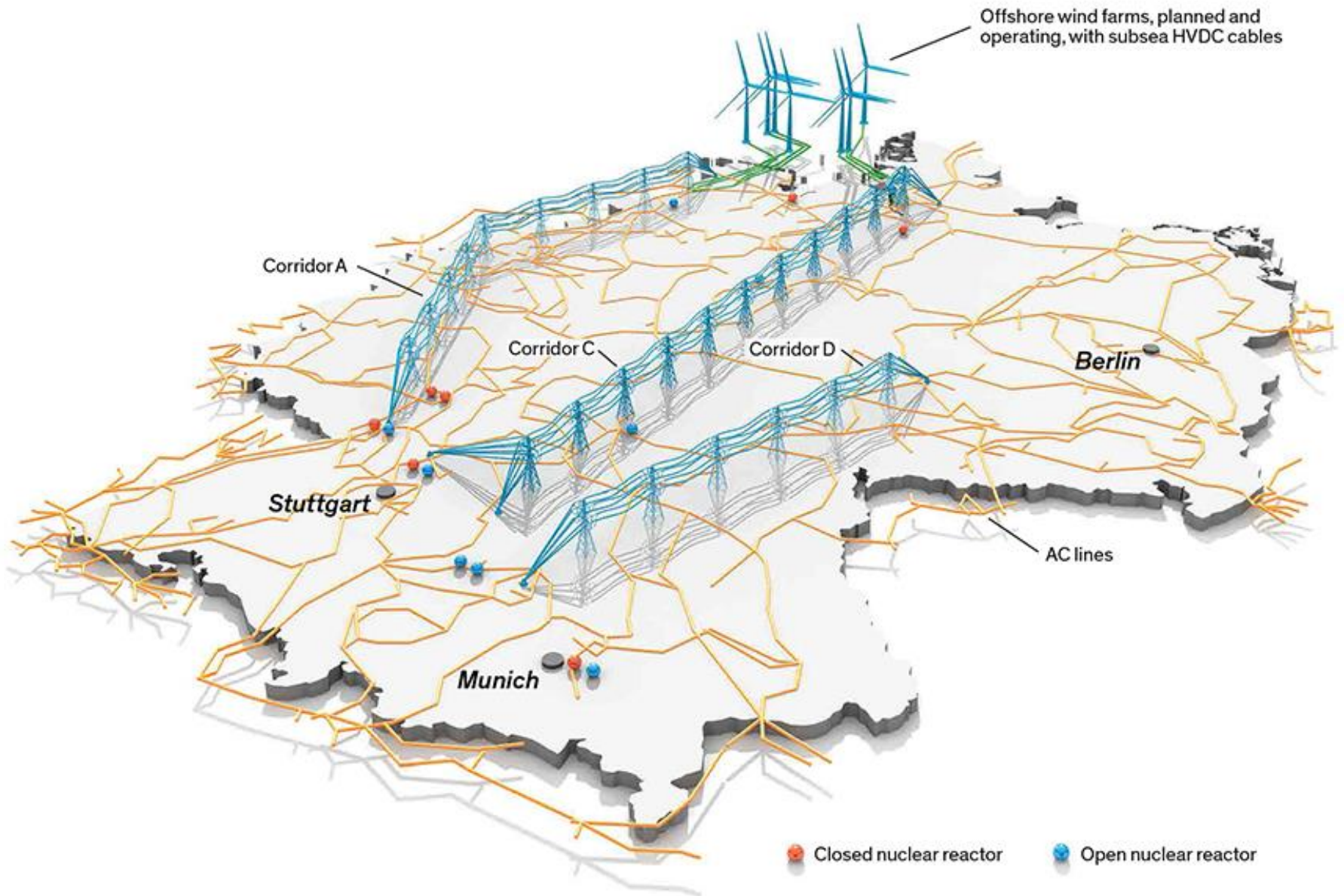
A zöld AC és a piros DC egyenesnek nyilván létezik metszéspontja: ilyen hosszú összeköttetés esetén az AC és a DC változat beruházási költsége egyenlő.

Kisebb távolságra az AC, nagyobbra a DC olcsóbb. Az interneten fellelhető adatok szerint a kék metszésponthoz tartozó hossz szabadvezeték esetén kb. 600 km, kábelnél kb. 60 km.

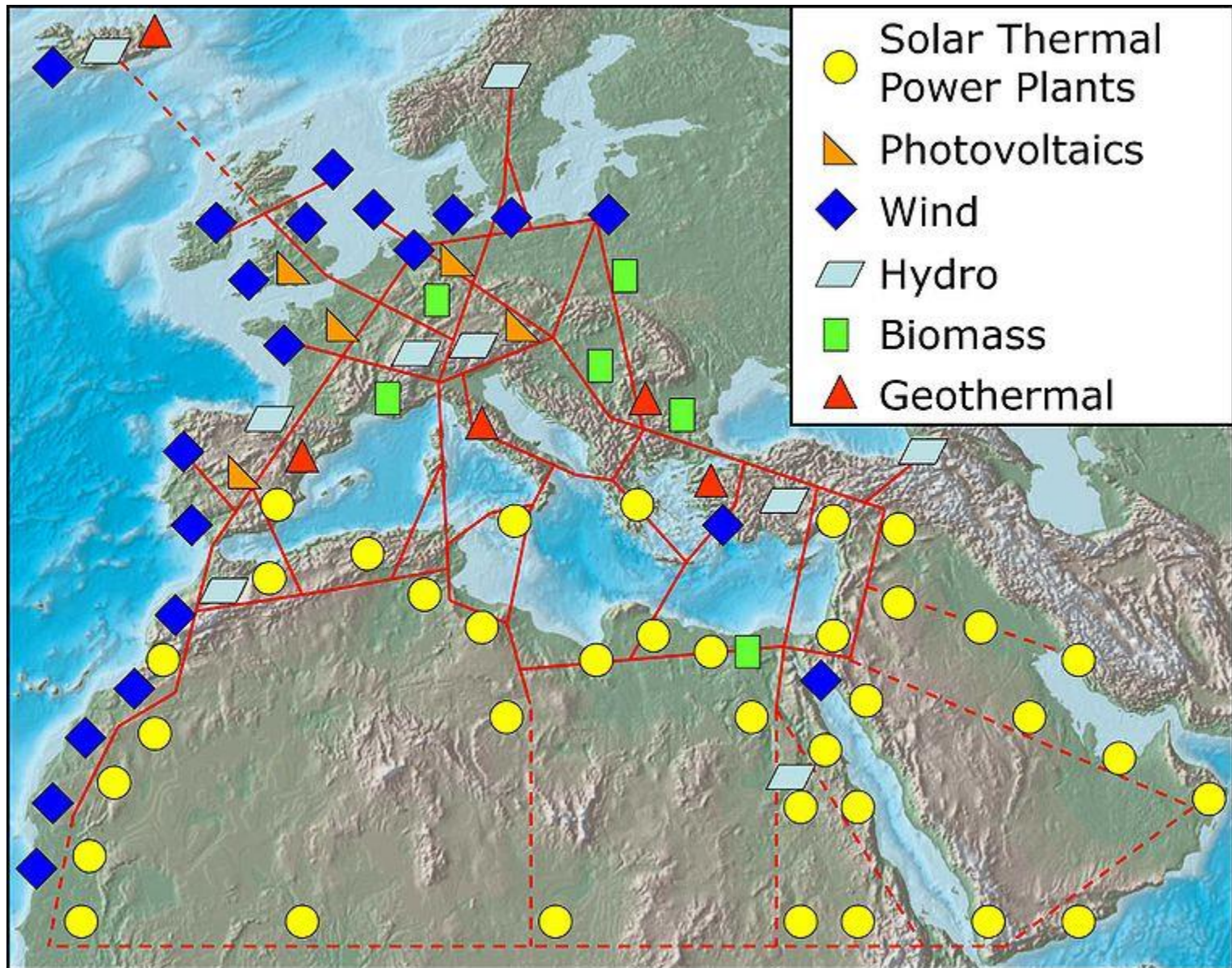
A konkrét számértékeket számos, itt fel nem sorolt tényező befolyásolja.



Németország 3 nagy észak-déli HVDC energiatranszportját tervez: kettőt az Északi-tengeri szélparkoktól, egyet a szászországi külfejtéses bányavidéktől.



Az egyenáramú Európai Supergrid, ahogyan azt dr. Gregor Czish, a németországi Kasseli Egyetem professzora elképzei ...



„Bohóc”oszlopok az Albertirsa-Martonvásár I-II. 400 kV-os váltakozó áramú távvezeték és az M5 autópálya kereszteződésében. Érdeklődéssel várják, hogy az Európai Supergrid elemeként mikortól fognak egyenáramot szállítani ...

