



UNIVERSITY OF PADOVA
ITALY

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING



130 ANNI DI SVILUPPI DALLA GUERRA DELLE CORRENTI TRA EDISON E TESLA

LE GRANDI TAPPE DELLA DISTRIBUZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA

MASSIMO GUARNIERI

CICLO SEMINARI LEDS 2016-17

Padova, 11 ottobre 2016



1879: Thomas A. Edison (1847-1931)

- lampada ad alta resistenza e bassa corrente
- adatta allo sfruttamento industriale
- ... non per primo ...



1881: Prima Esposizione Internazionale di Elettività a Parigi

lampade a incandescenza esibite:

- Joseph W. Swan (1828–1914)
- Thomas A. Edison
- St. George Lane-Fox (1856–1932)
- Hiram S. Maxim (1840–1916)





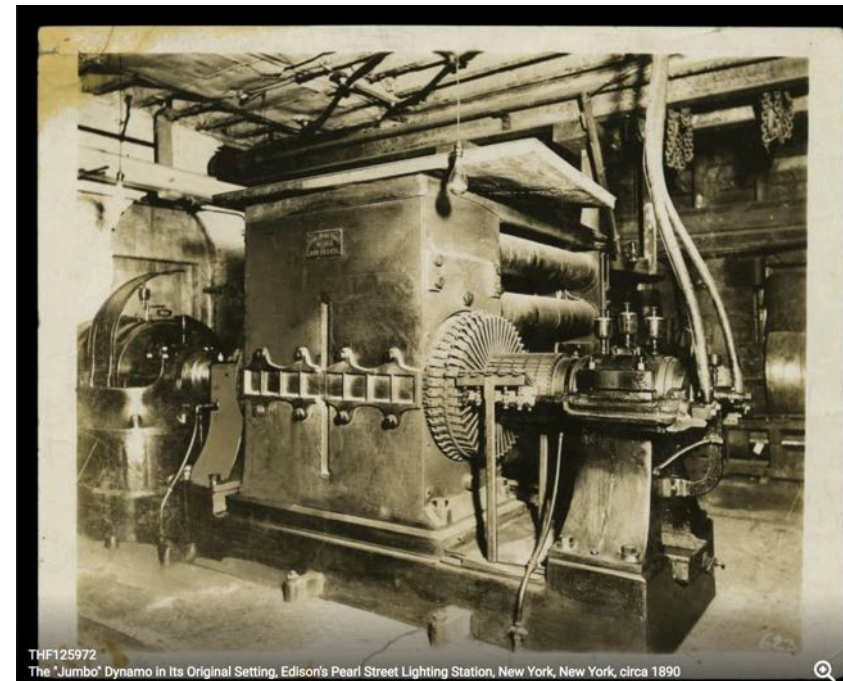
1882 - Edison

Aprile: Holborn Viaduct (Londra) – 2000 lampade

Settembre: Pearl Street (Manhattan) – 400 lampade

sistema per la distribuzione e vendita commerciale dell'energia elettrica per illuminazione prodotta da una centrale di Edison Illuminating Compay:

- Generatori Jumbo da 27 ton 100 kW
- Corrente continua a 110 V
Distribuzione derivata
(lampade in parallelo)
- Linee isolate ed interrate
- Contatori per la fatturazione dell'energia
(conta-carica elettrica)

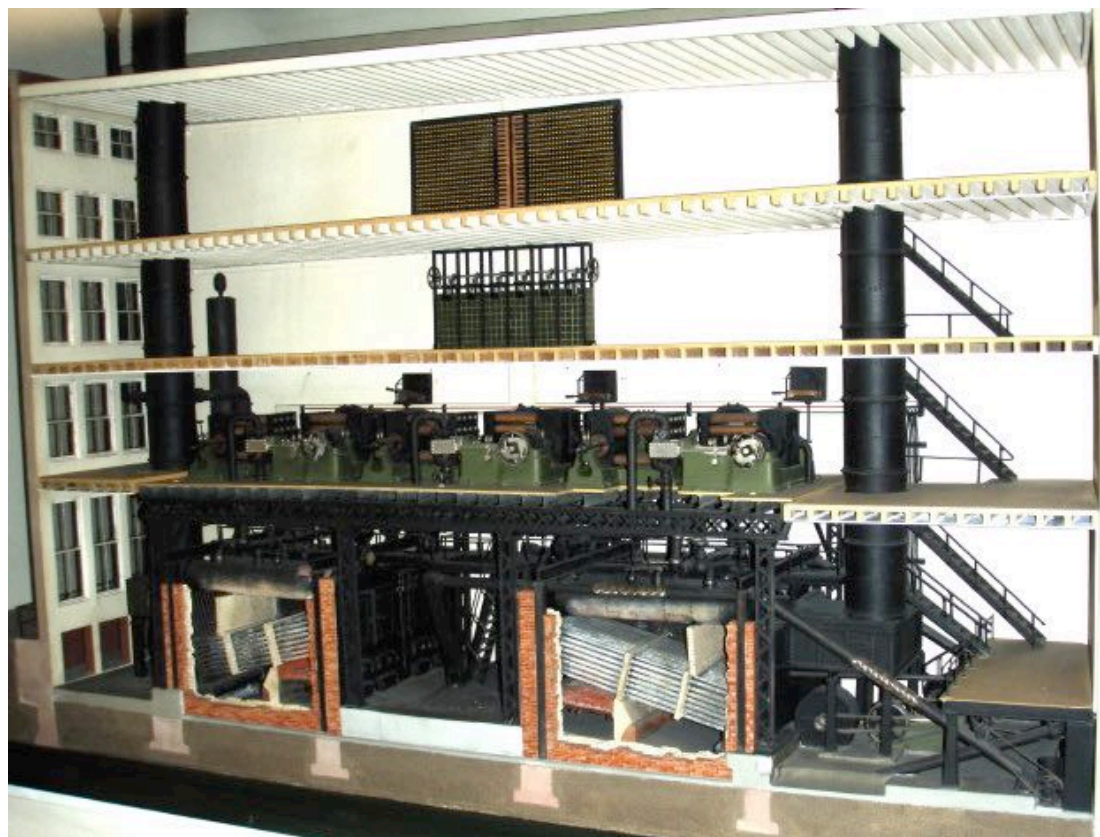


Per avere l'elettricità in casa non è più necessario comperarsi anche il generatore



UNIVERSITY OF PADOVA
ITALY

CENTRALE ELETTRICA





Supporto finanziario:

grandi finanzieri John Pierpont Morgan, ...

Collocazione strategica → promozione:

vicino a Wall Street

80 clienti influenti: New York Times, finanzieri, banche,...

Repliche immediate:

1883:

Santa Radegonda (MI) – Giuseppe Colombo
(*Società Edison*)

Gran Bretagna

Germania – Emil Rathenau (→ *AEG*)

1884:

Parigi, Tokyo

Linee in CC BT (110 V) limitate a poche centinaia di metri:

$$\frac{P_{diss}}{P_u} = \frac{2RI^2}{P_u} = \rho \frac{2L}{S} \frac{P_u}{V^2}$$



Marcel Deprez (1843-1918)

Progettista di linee in dc dal 1876

1881: progetto per linea di grande estensione

**1882: Esposizione elettrotecnica di Monaco
con Oskar von Miller (1855-1934)**

Prima trasmissione in cc a grande distanza:

1,5 kW a 2 kV, di 57 km tra Miesbach e Monaco

→ funziona, ma con rendimenti di trasmissione del 50%

1886: elettrodotto in cc a 6 kV di 60 km tra Creil e Parigi





René Thury (1860–1938) *re della corrente continua*

1889: sistema per la società Acquedotto de Ferrari-Galliera (GE)
630 kW 14 kV 120 km

1906: Progetto Lyon-Moûtiers
20 MW 125 kV 230 km (8 dinamo in serie)

1913: 13 impianti in funzione in UK, H, RU, F
macchinario più avanzato di quello di BT di Edison ma molto
costoso e complesso

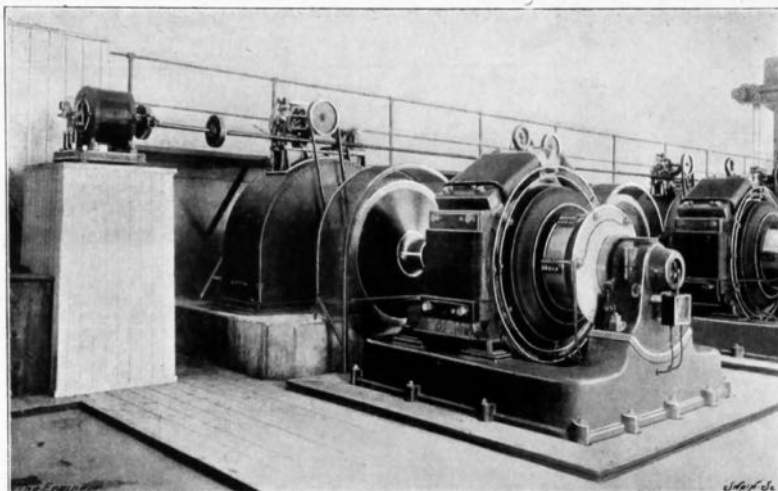
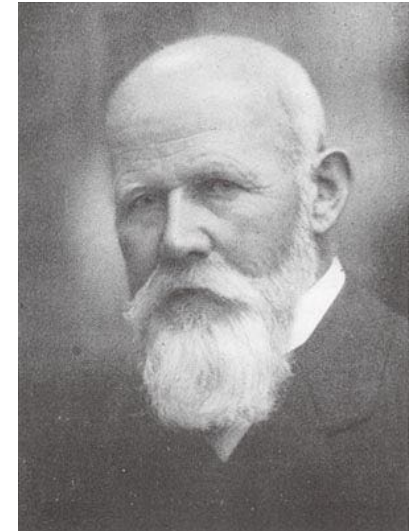


Fig. 1—THURY SERIES POWER TRANSMISSION, ISOVERDA AND GENOVA

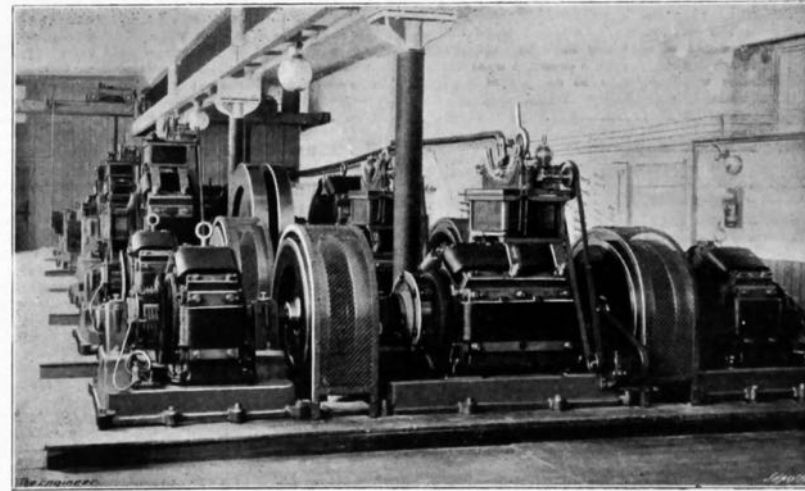
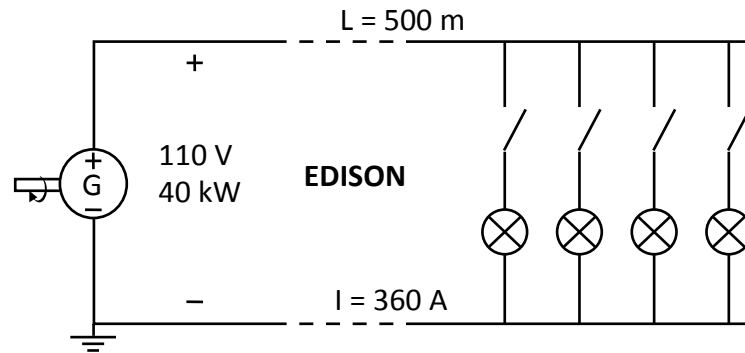
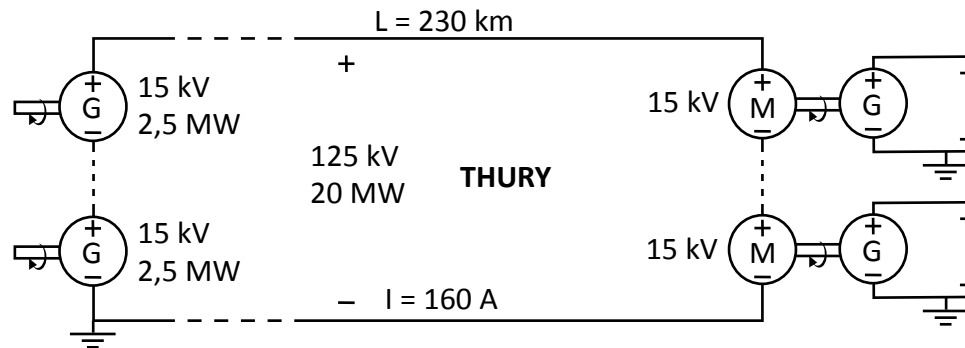


Fig. 2—THURY SERIES POWER TRANSMISSION, CHAUX-DE-FONDS



Edison:
idoneo all'utenza finale,
ma limitato a brevi distanze



Thury:
idoneo a grandi distanze,
precluso all'utenza finale



1850: Floris Nollet

Société de l'Alliance
alternatore (PM) pratico

1858: Frederick Hale Holmes

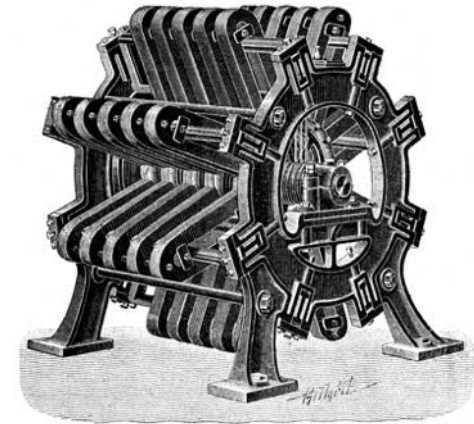
36PM, 1,5 kW, 600 rpm, 2 tons
faro elettrico di South Foreland

1878: Zénobe Théophile Gramme

alternatore industriale per candele di Jablochkov

1881: Siemens & Halske

sistema d'illuminazione elettrica stradale in corrente alternata con Alternatore *Siemens & Halske* e lampade ad arco a Godalming (UK)





1881: generatore secondario
Lucien Gaulard (1850-1888) e
John Dixon Gibbs (1834–1912)
1882: brevetto

Archetipo del trasformatore moderno



- rapporto di trasformazione 1:1
- circuito magnetico parzialmente in aria
- disaccoppiamento galvanico tra primario e secondario
- più macchine con primari in serie permettono livelli diversi di tensione tra trasmissione e distribuzione alle utenze:
trasmissione dell'energia in alta tensione e distribuzione in bassa tensione, in condizioni di sicurezza per le utenze





1884

Galileo Ferraris (1847-1897)

Lucien Gaulard (1850-1888)

Dimostrazione trasmissione in cc a grande distanza:

Torino-Lanzo – 34 km

alternatore *Siemens & Halske* da 2 kV a 130 Hz

generatori secondari 1:1 con i primari in serie e secondari in bassa tensione

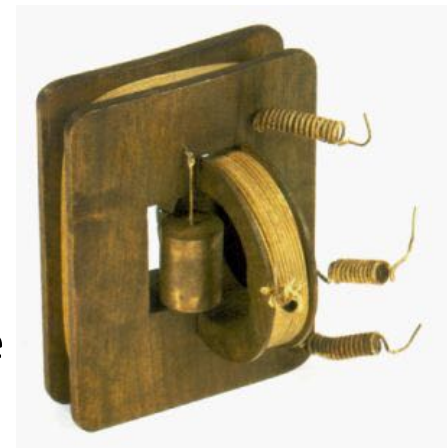


Ferraris - studi sulla corrente alternata

1884: fattore di potenza - $\cos\phi$

1885: scoperta del campo magnetico rotante

1888: formalizzazione teorica del campo magnetico rotante





1883: Rankin Kennedy
propone la distribuzione derivata in ca (primari in parallelo)

1885

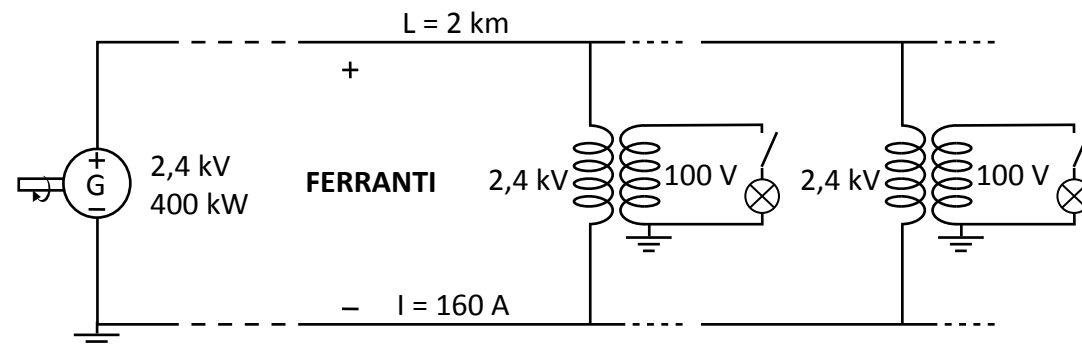
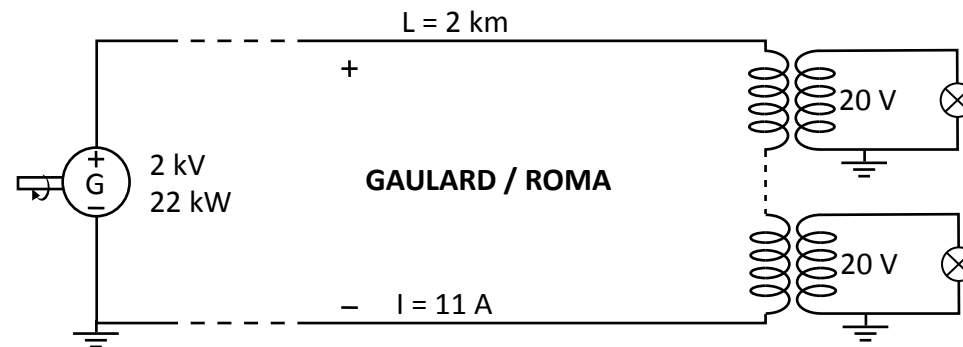
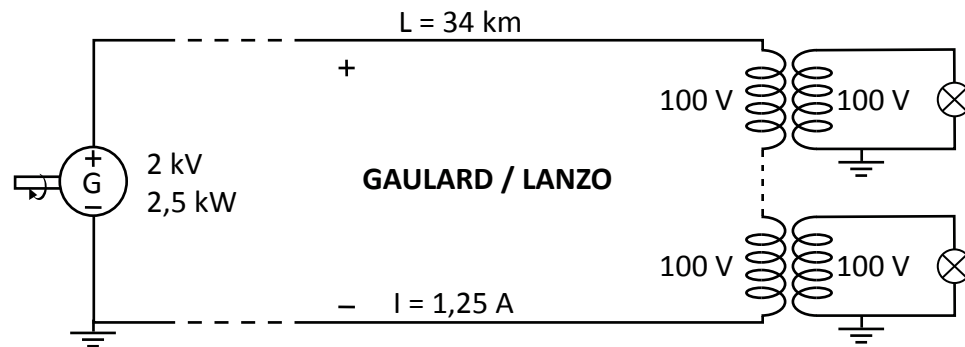
Ottó Titusz Bláthy (1860-1939) (*Ganz & Co.*):
trasformatore a nucleo chiuso

Bláthy + K. Zipernowsky + M. Déri (*Ganz & Co.*):
sistema ZBD
distribuzione derivata (trasformatori in parallelo)

via dei Cerchi (Roma) impianto per illuminazione pubblica con trasformatori
2 alternatori *Siemens & Halske* da 22 kW a 2 kV e 120 Hz e trasformatori Gaulard, uno
per ogni lampada a 20 V, con circuito magnetico chiuso e primari in serie

Grosvenor Gallery (Londra) impianto commerciale con trasformatori
trasformatori 2,4 kV/100 V, uno per utente, con primari in parallelo;
alternatori: prima *Siemens & Halske* e poi *Ferranti* da 400 kW a 2,4 kV e 83 Hz







Monofase

1889: S. Z. de Ferranti (1864-1930)

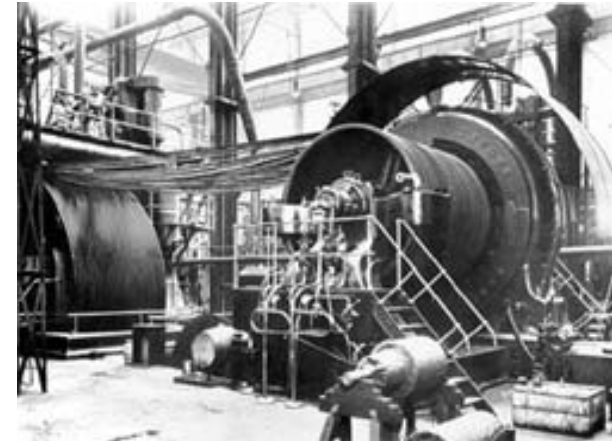
centrale di Deptford (Tamigi)

per alimentare Londra

4 macchine da 1 MW 10 kV 85 Hz

cavi a 10 kV (record per ac) di 11 km

tensione record per il tempo

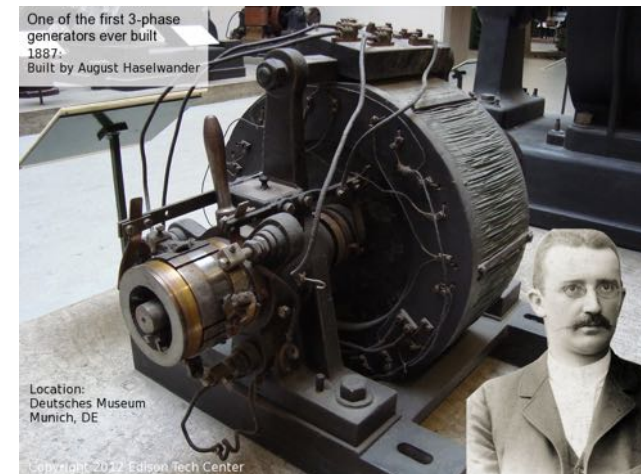


Trifase

1882: brevetto di Hopkinson

1887: Friedrich Haselwander (1859-1932)

primo alternatore sincrono trifase



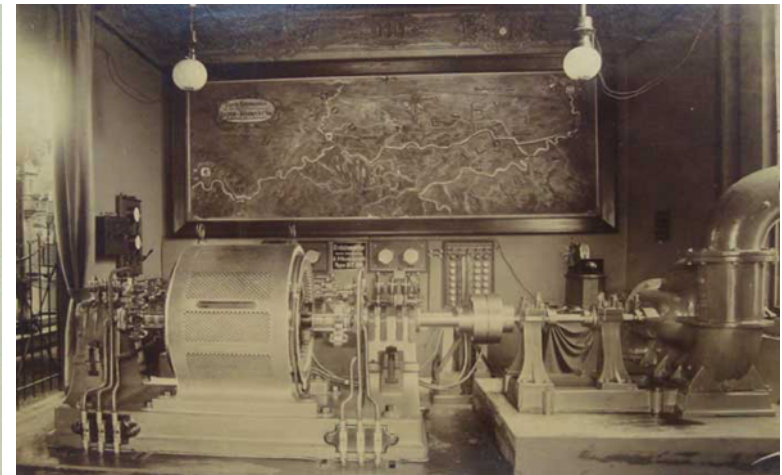
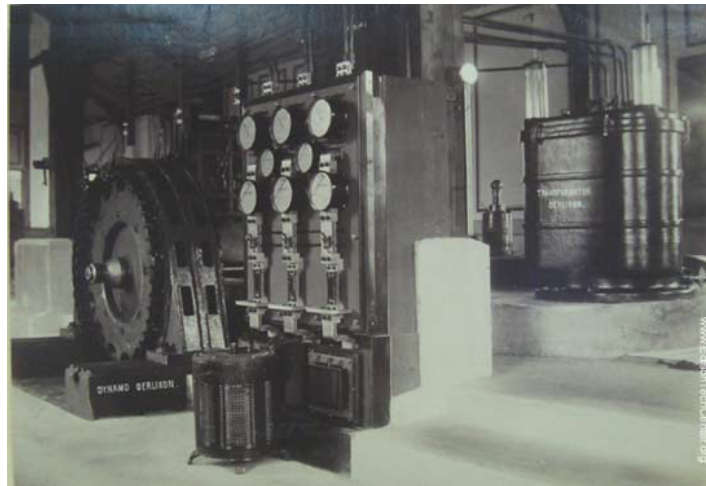
1889: M. O. Dolivo-Dobrowolsky (AEG) e C. E. L. Brown (Maschinenfabrik Oerlikon – Zurigo): primi motori asincroni trifase (20 Hp, 15 kW)



1891

Oscar von Miller - Esibizione Internazionale di Francoforte

prima linea trifase, da 240 kW 15 kV 175 km da cascate Lauffen sul Neckar a Francoforte.



Impianti:

C. E. L. Brown (*Maschinenfabrik Oerlikon*):

alternatore trifase 240 kW 86 V 40 Hz e trasformatori **trifase**

AEG:

trasformatori trifasi e motore asincrono **trifase** da 100 Hp (75 kW)

Dimostra le potenzialità della trasmissione trifase di elevate potenze a grande distanza con elevato rendimento

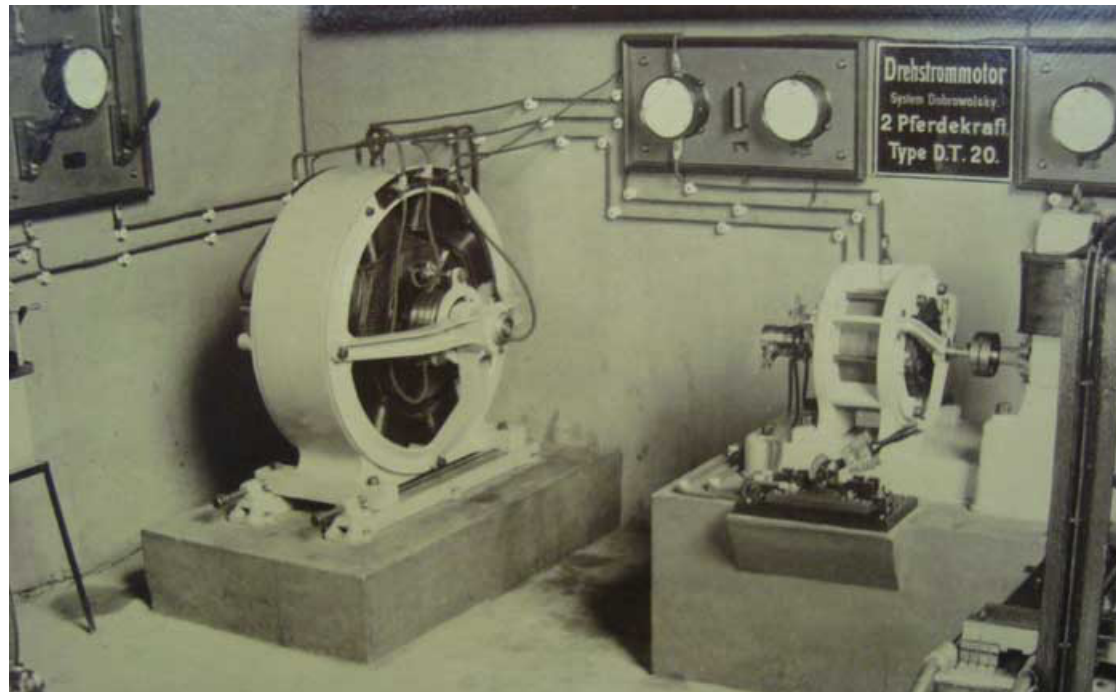


Sviluppi commerciali in Europa

1891: Fondazione di *Brown Boveri & Company (BBC)*

1893: *Siemens*: centrale trifase a 5 kV a Soden (Germania)

1893: *ASEA Jonas Wenström*: centrale trifase con linea di 14 km a Ludvika (Svezia)





1885-6

George Westinghouse (1846-1914)

dopo dimostrazione a Torino del 1884

1885: acquista tecnologia e brevetti europei

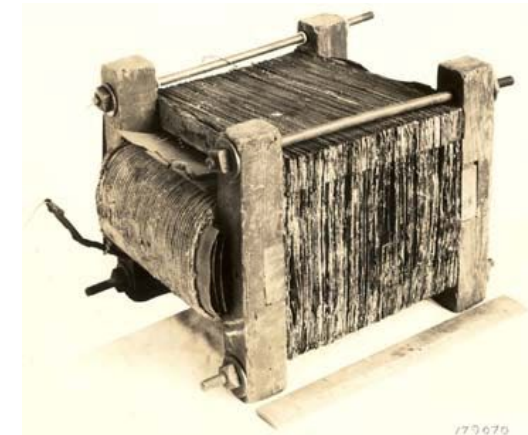
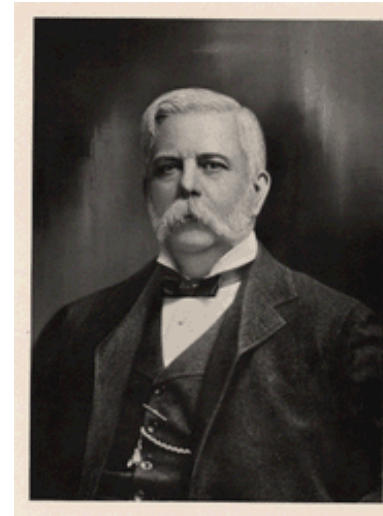
1886: *Westinghouse Electric Company*

ingaggia **William Stanley Jr. (1858-1916)**

- primo trasformatore a lamierini pratico
- Great Barrington (MA):
primo sistema americano in ca
con trasformatori sia elevatori che riduttori

1886: *Thomson-Huston Electric Company*

sistemi in corrente alternata per illuminazione con lampade ad arco





Inizialmente lavora per Edison

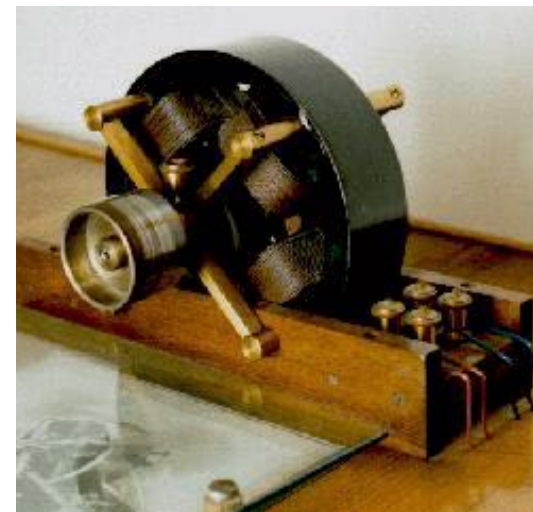
1882: Continental Edison (Parigi)

1884: Edison Menlo Park Laboratory (New York)

Poi rompe e lavora in proprio

1887: Nikola Tesla (1857-1943) richiede il brevetto (registrato nel 1888) per motore **bifase** a campo rotante con gli induttori avvolti su un unico anello ferromagnetico: primo **motore ad induzione** (asincrono) per potenziale sviluppo pratico

1888 conferenza AIEE: *A new system of alternate current motors and transformers*
promuove i suoi sistemi in alternata





Westinghouse

1888 – motore ad induzione

da Ferraris: diritti del campo rotante (1.000\$)

da Tesla: brevetto del motore bifase ad induzione appena brevettato
(60.000\$+2,5\$ per ogni Hp costruito, pagati fino al 1897)

1888: ingaggio di Tesla come consulente a 2000\$/m

1891: perfezionamento ed inizio commercializzazione
(stesso anno delle macchine trifasi europee)

1889: Willamette Falls (OR) - prima centrale idroelettrica americana in ca
4kV/100V 125 Hz, 22 km



CONTINUA O ALTERNATA?

Competizione tra i due sistemi anche in Europa, ma in America ogni mezzo è buono per prevalere

1890: penitenziario di Auburn (Albany, NY) prima esecuzione con sedia elettrica con alternatore Siemens, scelto dal schieramento pro-Edison per dimostrare che l'alternata è letale.

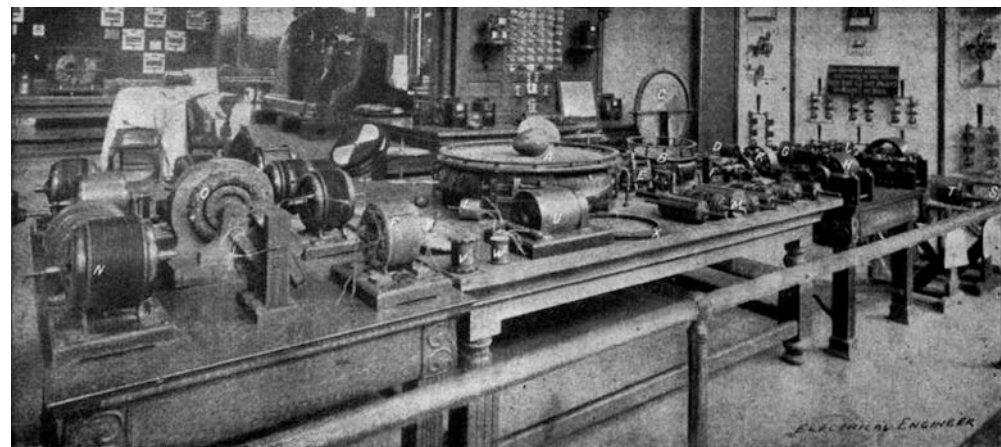
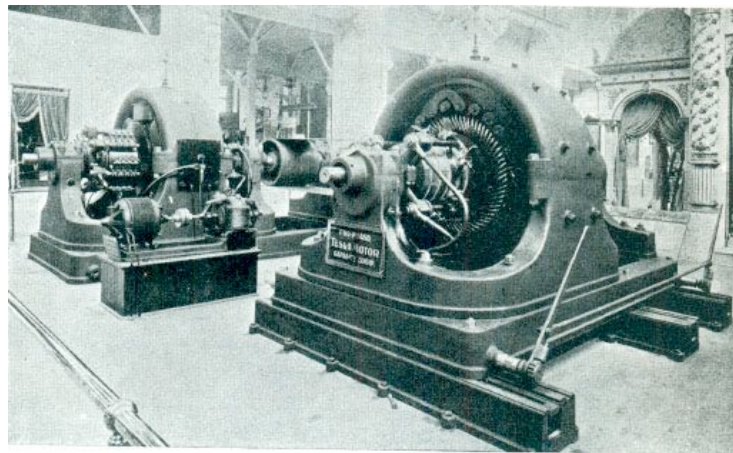




1892: General Electric (Edison General Electric Company + Thomson-Houston Electric Company) per competere nel mercato dell'alternata, oramai vincente

1893: World's Columbian Exposition di Chicago

Westinghouse vince la gara per fornire il suo sistema universale,
2 alternatori Tesla + 96000 lampade + convertitrice ac/dc + piccola ferrovia →
dimostra versatilità ed affidabilità per ogni tipo di fornitura di potenza elettrica
"Tesla Polyphase System" Tesla presenta il suo sistema bifase: alternatori, motori, convertitori





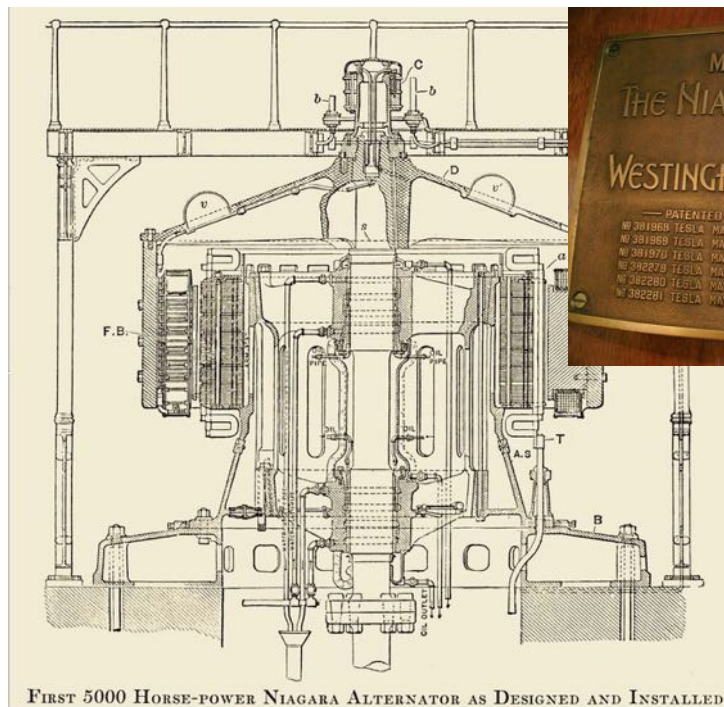
1893: assegnazione a Westinghouse

(dopo il rifiuto alla BBC svizzera, tecnologicamente più avanzata, ma straniera)

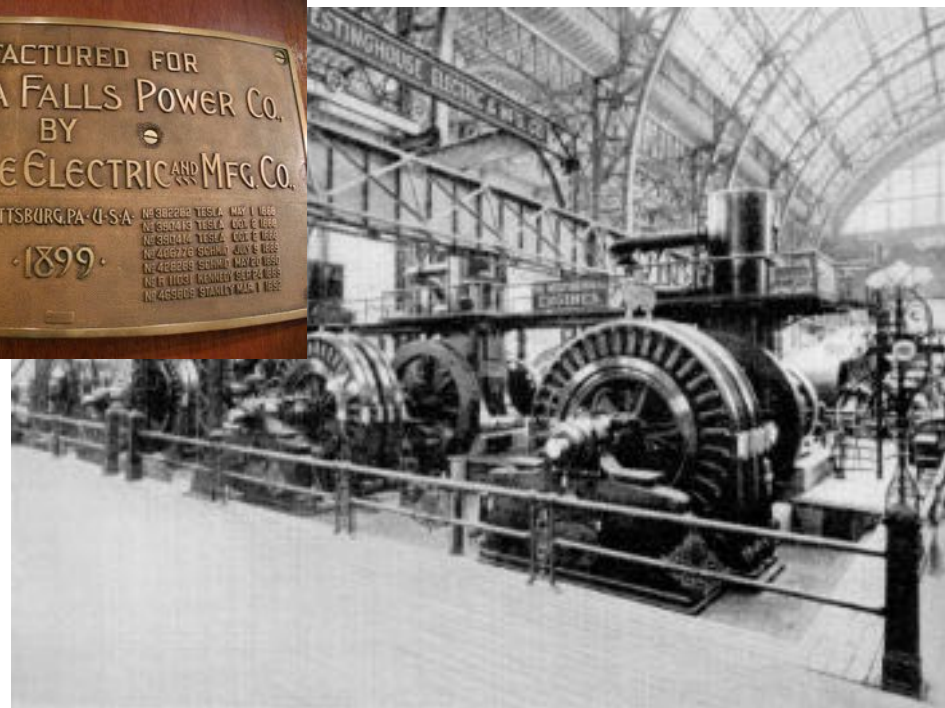
contratto per la prima centrale: bifase 3,5 MW 2,2 kV

progetto di Tesla

1895: messa in servizio (secondo sistema polifase americano, dopo quello di Stanley del 1893)



FIRST 5000 HORSE-POWER NIAGARA ALTERNATOR AS DESIGNED AND INSTALLED

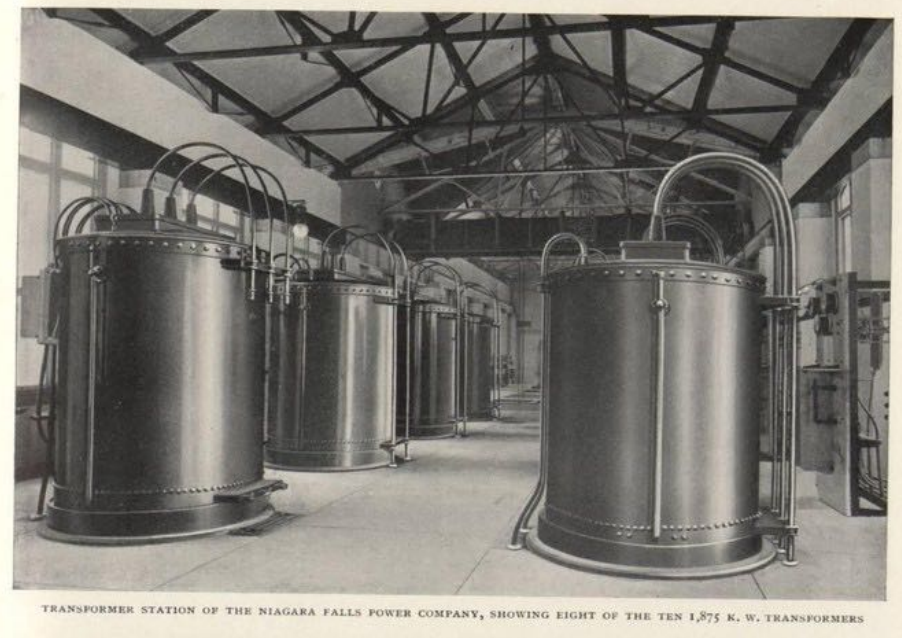




L'immediato successo (avvio di varie fabbriche che hanno bisogno di energia elettrica a basso costo) impone un rapido potenziamento

1897: ampliamento trifase - GE + Westinghouse - 36 MW 11 kV

1902: secondo ampliamento - genera 1/5 della potenza USA





1898: Società Edison

entra in servizio la centrale idroelettrica trifase a Paderno d'Adda
7 alternatori BBC (Brown Boveri Company)
9 MW a 13,5 kV (un record per l'epoca) e 42 Hz

- linea trifase pure a 13,5 kV alimenta Milano (tram)
 - più grande centrale elettrica europea
 - inizia lo sfruttamento idroelettrico delle risorse alpine
 - Esempio per analoghi impianti (Svezia, ...)
- industrializzazione della pianura padana.

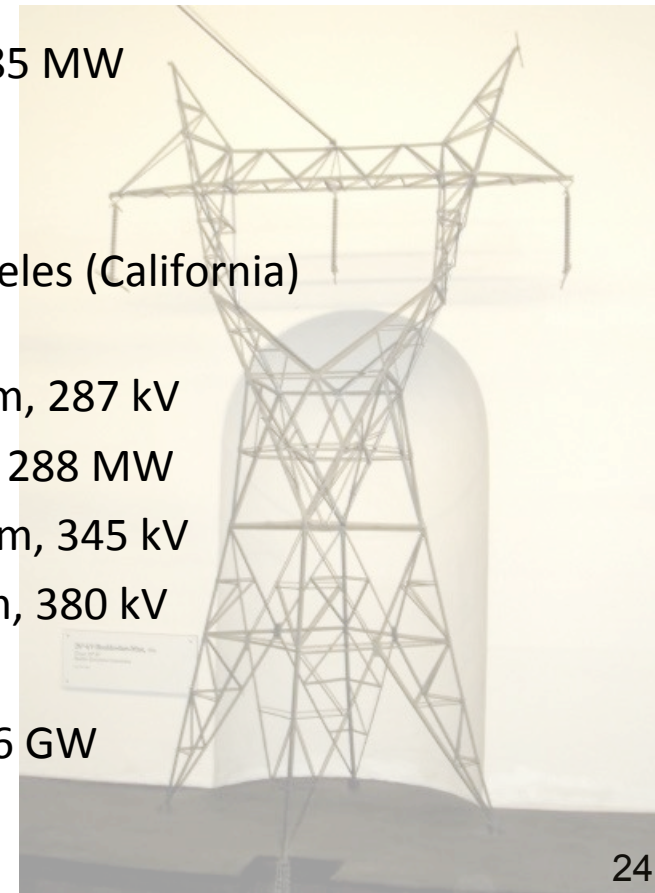




Boom della trasmissione in corrente alternata

Trasmissione a grande distanza con elettrodotto in alta tensione:

- 1889: Deptford (GB) 11 km, 10 kV, 4 MW
- 1892: Aniene-Roma 28 km, 5 kV, 1,2 MW
- 1907: Croton-Muskegon (Michigan), 50 km, 110 kV, 8,85 MW
- 1908: California 180 km, 110 kV
- 1923: Emilia, 160 km, 130 kV
- 1923: Sierra Nevada-San Francisco e Big Creek-Los Angeles (California) a 220 kV
- 1936: Hoover dam – Los Angeles (Nevada, USA), 430 km, 287 kV
- 1952: Harsprånget-Hallsberg (Svezia), 952 km, 380 kV, 288 MW
- 1953: Sporn-Muskingum-Waterford (Ohio, USA), 170 km, 345 kV
- 1957: Rommerskirchen-Bürstadt-Hoheneck (D), 341 km, 380 kV
- 1965: Quebec (CAN), 735 kV
- 1976: Kasachstan-Tambow (URSS), 1000 km, 1200 kV, 6 GW





Penetrazione dell'energia elettrica ad uso industriale:

1899: <5% della forza motrice totale negli Stati Uniti

1909: 25%

1919: 55%

1929: 85%

Penetrazione per usi residenziali:

1921: il 12% delle abitazioni britanniche è servito dall'energia elettrica

1930: il 70% delle abitazioni americane è servito dall'energia elettrica

>1935: inizia l'elettificazione delle aree rurali in USA = affermazione totale della
distribuzione elettrica

Aumento dell'efficienza di fornitura:

Nell'arco di sessant'anni (1900-1960) il rendimento degli impianti di generazione e trasmissione aumenta di un fattore 10: a parità di energia elettrica fornita è sufficiente un decimo di risorse primarie



ERANO SMART?

Tanto quanta era l'intelligenza immessa dall'uomo (conoscenze) e le possibilità tecniche del tempo

Interconnessione in reti sempre più grandi:

- spianatura dei picchi delle utenze, curva di carico priva di variazioni repentine,
- gestione collaborativa delle centrali, per bilanciare dinamicamente la domanda
- ma anche complessità di gestione e rischi di eventi anomali e dei guasti
- esigenze di studio, analisi, previsione, implementazione di contromisure in caso di guasto (rischi di black-out ...)



1931 - Vannevar Bush (1890-1973) - MIT - Stati Uniti

Calcolatore elettromeccanico analogico

Sviluppato per affrontare problemi di analisi e gestione delle grandi reti elettriche

- Risolve sistemi di equazioni differenziali con 18 variabili (impossibili “a mano”)
- Avvia le ricerche sulle macchine da calcolo che porterà alla prima generazione di elaboratori elettromeccanici





RINASCITA DELL'HVDC (High Voltage Direct Current)

1929: Uno Lamm (ASEA): raddrizzatore a vapori di mercurio ad elettrodi sequenziali adatti alla AT

1941: Siemens: Elbe Projekt 115 km dall'Elba a Berlino 60 MW ± 200 kV

1945: requisito da URSS: Moscow–Kashira, 112 km 30 MW ± 100 kV

cavi sottomarini e lunghe linee aeree con debole stabilità

ASEA, monopolio

1954: 20 MW, 380 kV Gotland Svezia

1961: 160 MW ± 100 kV, Francia-Inghilterra

1965: 250 MW ± 275 kV Danimarca-Svezia

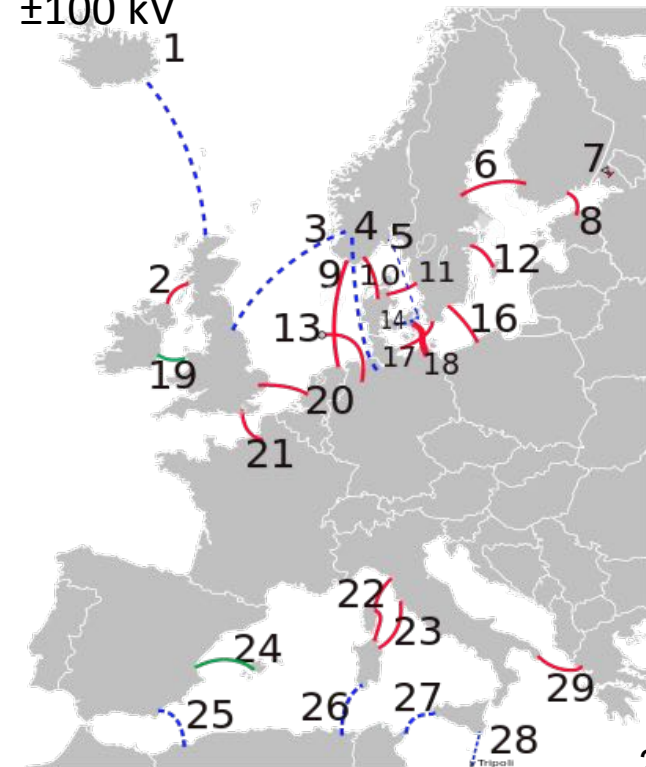
300 MW ± 125 kV Giappone

600 MW ± 250 kV isole del sud e
del nord in Nuova Zelanda

1968: 200 MW 200 kV Sardegna-Italia

1970: Pacific Intertie 1380 km 1,44 GW ± 400 kV

.....





BOOM DELL' HVDC

1956 GE: tiristore (raddrizzatore allo stato solido)

1979: AEG, BBC, Siemens linea Mozambico-Sud Africa
1420 km, 1,9 GW, ± 533 kV,

...

1984: Itaipú (Br) 800 km, 6,3 GW, ± 600 kV

2010: Xiangjiaba–Shanghai 2.071 km, 6,4 GW, ± 800 kV

...

E nuovi dispositivi allo stato solido per raddrizzamento
in AT che ampliano la possibilità del HVDC

1980 GE: IGBT (insulated-gate bipolar transistor),
GTO (gate turn-off thyristor)

1997 Mitsubishi+ABB: IGCT (integrated gate-commutated thyristor)



Inoltre sistemi HVDC più piccoli e “leggeri”, di più vasta applicazione:

ABB: HVDC Light

Siemens: HVDC Power Link Universal System (PLUS)

Alstom: HVDC MaxSine



NUOVI SCENARI PER LA CORRENTE CONTINUA BT E MT: SMART GRID

Fonti rinnovabili con vocazione in dc:

- Fotovoltaiche dc
 - Eoliche in pratica dc (a valle dell'inverter connesso all'alternatore)
 - ...
 - Le fonti rinnovabili sono spesso distribuite e intermittenti
 - Utenti diventano **utilizzatori/produttori**
 - Gestione ottimale per mezzo di sistemi di accumulo energetico dc
- Flussi di potenza bidirezionali con gestione e negoziazione dell'energia ottimizzata =

SMART GRID

- Anche molti dispositivi utilizzatori sono essenzialmente dc
- E si possono costruire trasformatori dc/dc allo stato solido efficienti ed economici
- Le reti possono essere rese ancora più SMART
- Diventa possibile gestire le reti e le interconnessioni in corrente continua a diversi livelli di potenza e tensione
- Evoluzione verso ENERGY HUB in dc BT e MT



BE SMART!

nessuno diventa davvero stupido finché continua a porsi domande
(C. Steinmtz)

GRAZIE PER L'ATTENZIONE