

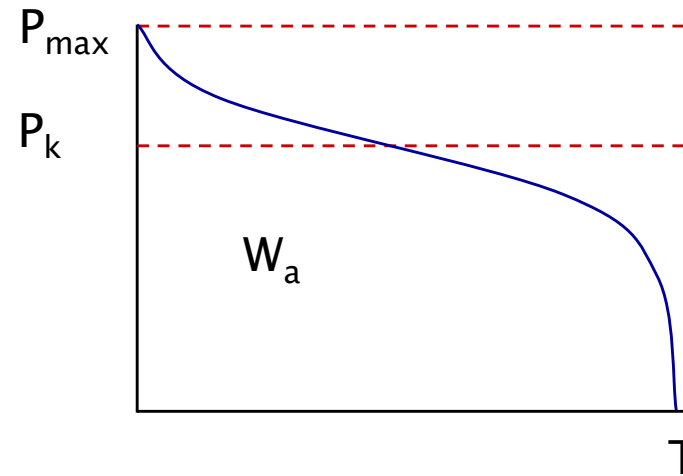
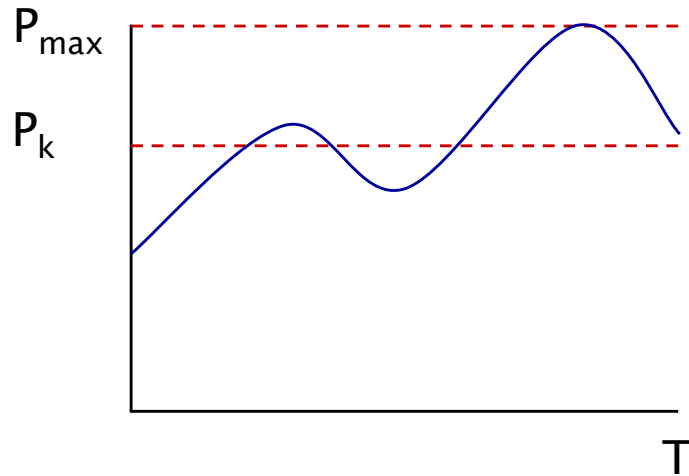
Introduction to hydrogen economy

Luento 2

Sähkömarkkinat & sähkön tuotanto

Matti Lehtonen

Kuorman vaihtelu ja pysyvyyskäyrä



käyttökerroin $\varepsilon = \frac{P_k}{P_{\max}}$

käyttöaika $t_k = \frac{W_a}{P_{\max}} = \frac{P_k T}{P_{\max}}$
 $= \varepsilon T$

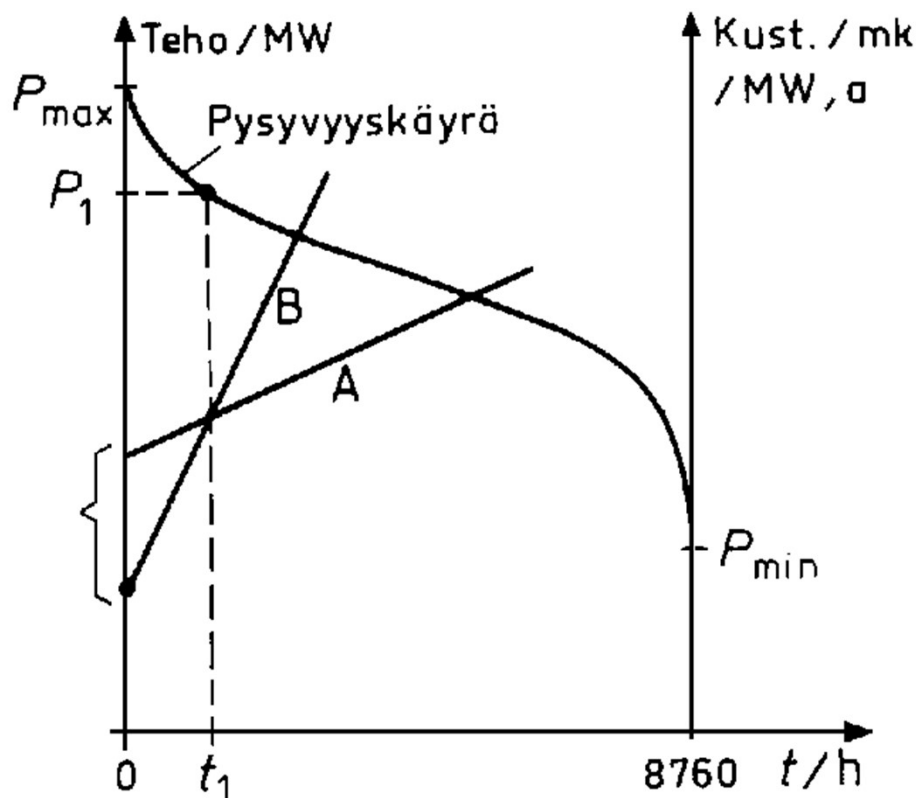
$$\left\{ \begin{array}{l} W_a = \text{vuosienergia} \\ P_k = \text{keskiteho} \\ P_{\max} = \text{maksimiteho} \end{array} \right.$$

Voimalaitosten ominaisuudet ja tuotantokustannukset

Sähkön tuotannossa tarvittavan voimalaitoskapasiteetin rakenne ja eri voimantuotantomuotojen osuus määräytyy pääosin seuraavista tekijöistä:

- kulutuksen aikavaihtelu
- käytettävissä olevat energiavarat (vesi, polttoaineet)
 - käytettävissä olevat isot lämpökuormat
- voimalaitosten kulutusrakenne

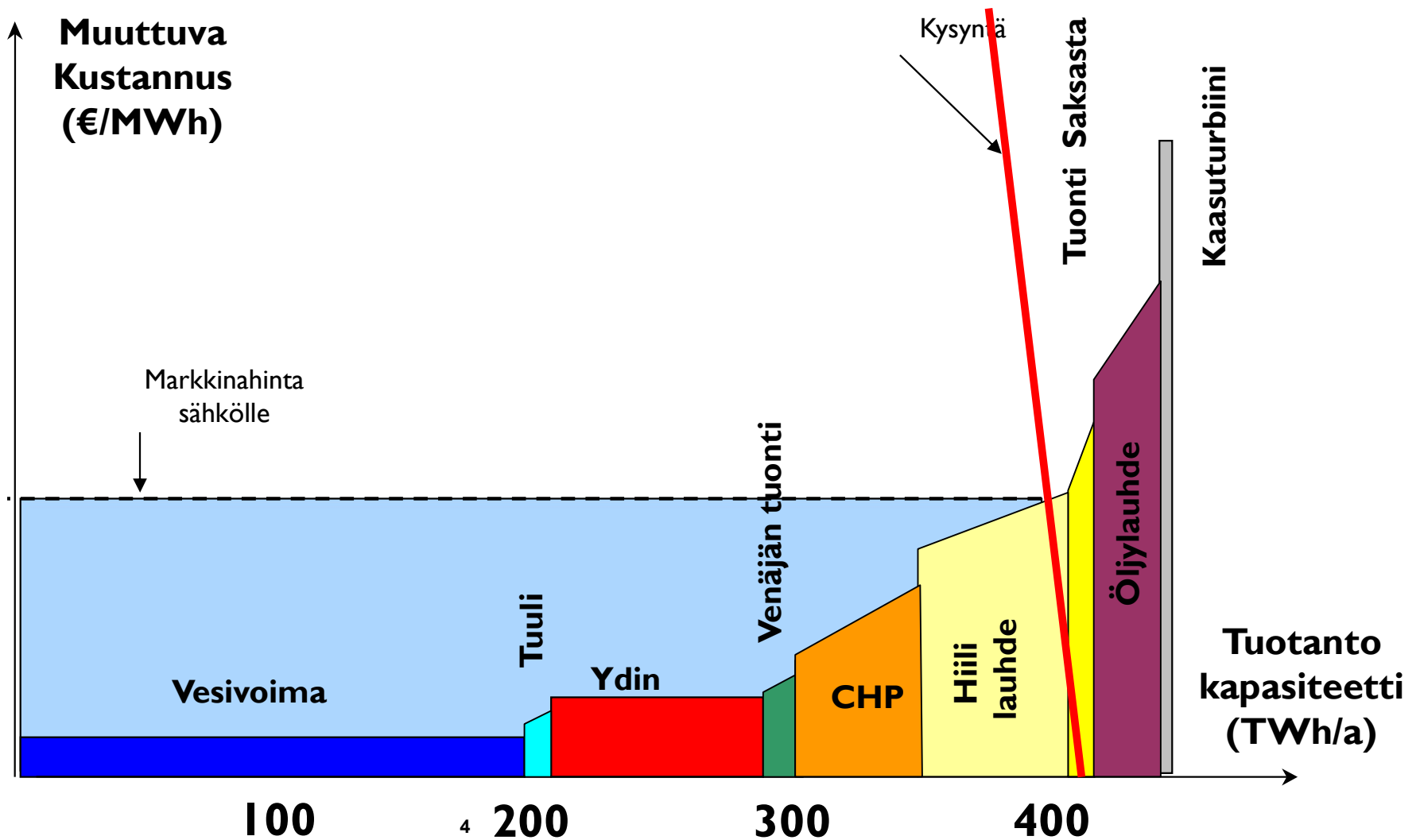
Kun sähkön kulutuksen tunneittaiset tehot pannaan suuruusjärjestykseen, saadaan kulutuksen pysyvyyskäyrä



Eri voimalaitoksilla on erilainen tuotantokustannusrakenne kiinteiden ja muuttuvien kustannusten kesken. Kuvaan on piirretty kaksi esimerkkiä. Peruskuormaa ajamaan tarkoitetulla laitoksella (kustannussuora A) on tyypillistä suuret investoinnit ja pieni polttoaineen hinta. Huippukuormalaitoksella (kustannussuora B) puolestaan investointi on pieni ja polttoainekustannus suuri. Jos tarvittava voimantuotantokapasiteetti koottaisiin näistä kahdesta voimalaitostyyppistä, on helppo nähdä kuvan perusteella, että mahdollisimman pieniin tuotantokustannuksiin päästään, jos tarvittava teho (P_{\max}) jaetaan kahteen osaan kustannussuorien leikkauspistettä vastaavan aikamäärän kohdalta. Peruskuormatehoa on tällöin P_1 ja huippukuormatehoa $P_{\max} - P_1$. Pysyvyyskäyrän rajaamat vastaavat pinta-alat ilmoittaisivat vastaavat ko. koneistolla tuotettavat vuotuiset energiamäärät.

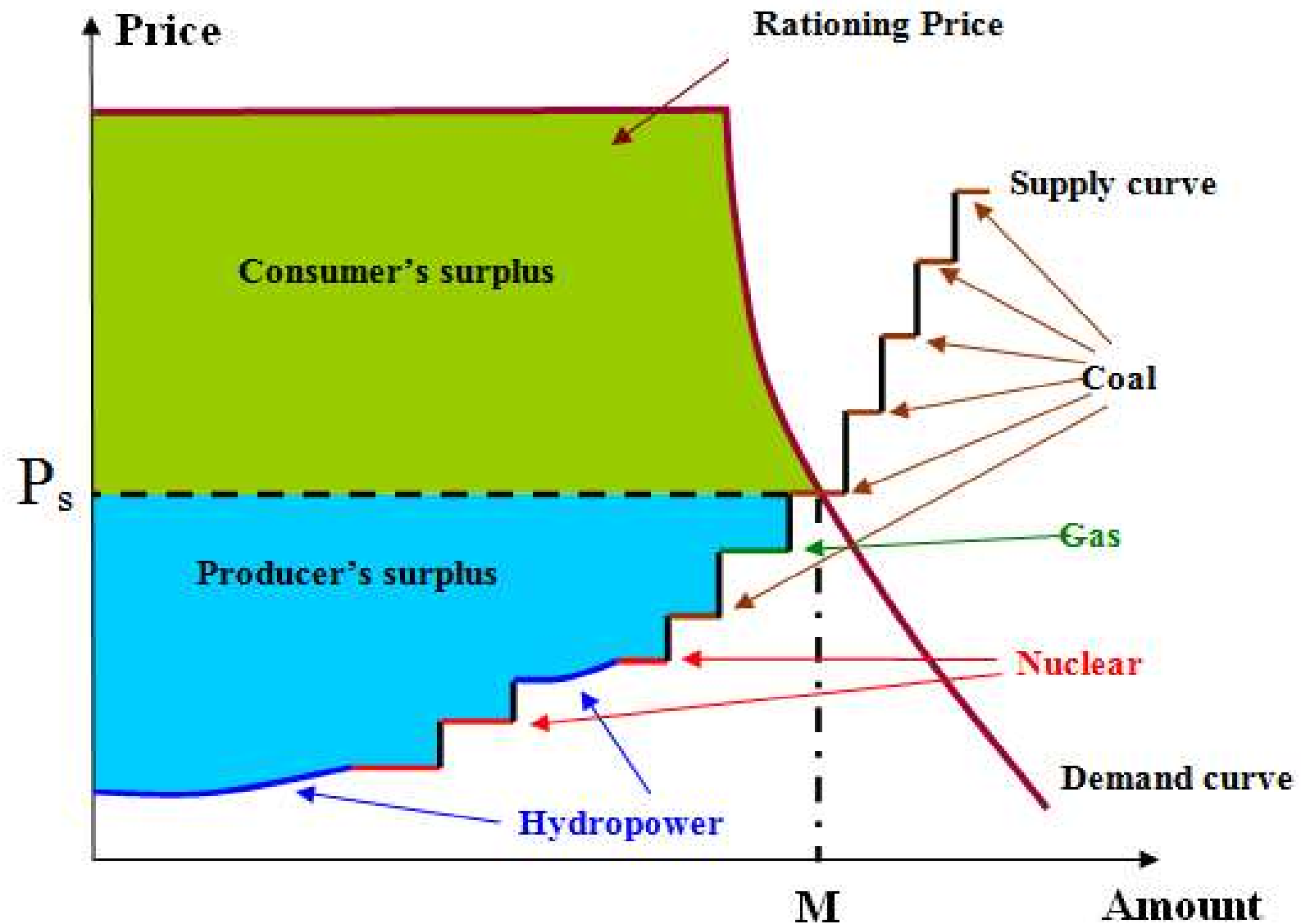
Voimalaitoskapasiteetin suunnittelussa on käytettävissä useita vaihtoehtoisia voimalaitostyyppisiä, joilla on erilaiset kustannusrakenteet. Kunkin teho-osuus määrätään edellä esitetyn periaatteen mukaan niin, että kokonaiskustannus tulee mahdollisimman pieneksi.

Hinnanmuodostus Pohjoismaiden markkinoilla



SOURCE: Federation of Finnish Technology industries

Hinnanmuodostus: Nord pool spot



Pohjoismainen yhteis- käyttöverkko



Nordel

Sähkötörkkinat ja sähkön siirto



Tehotasapaino käyttötunnilla ylläpidetään reservein ja säätösähkömarkkinoiden avulla

Taajuusohjattu käyttöreservi

säätää koko ajan:
pyörivät
Pohjoismaiset
voimalaitokset
sekä osto Venäjän
ja Viron
tasasähkölinkien
välityksellä

Säätösähkömarkkinat

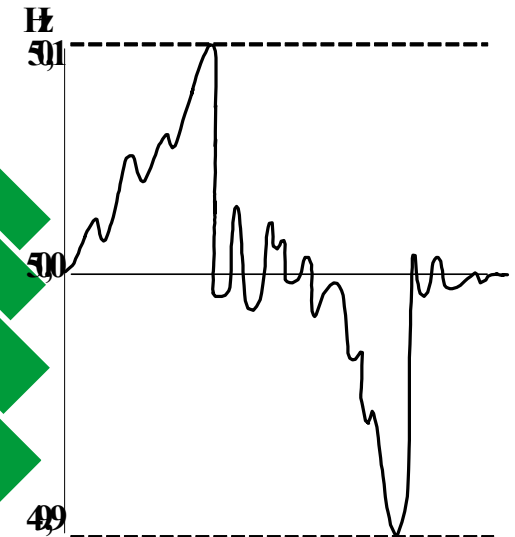
käytetään 70 %
tunneista:
Pohjoismaiset
voimalaitokset ja
tuontia

Taajuusohjattu häiriöreservi

korjaa
automaattisesti
taajuutta
häiriötilanteissa:
pyörivät
Pohjoismaiset
voimalaitokset ja
irtikytkettävät
kuormat

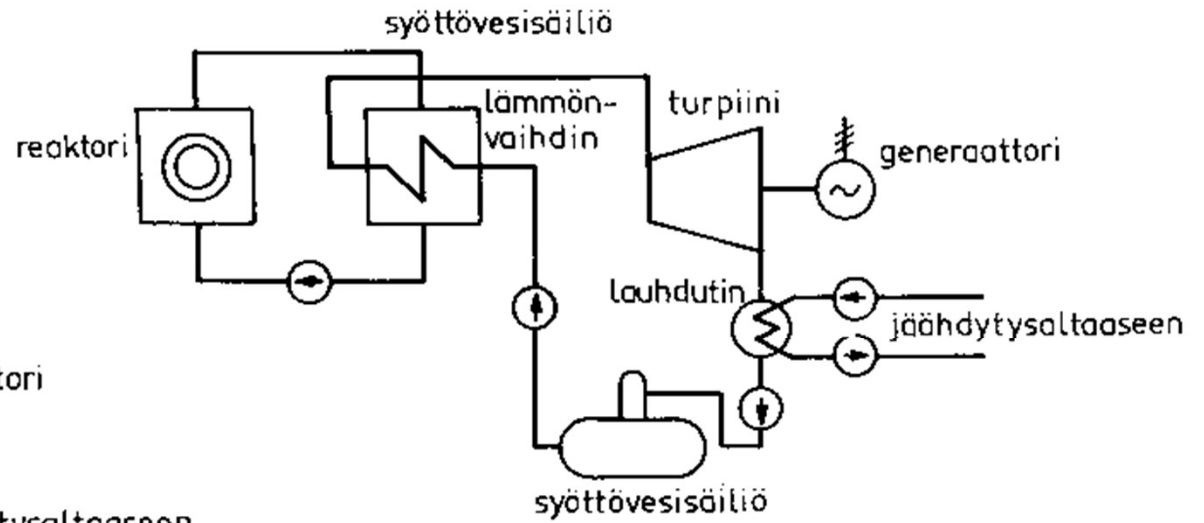
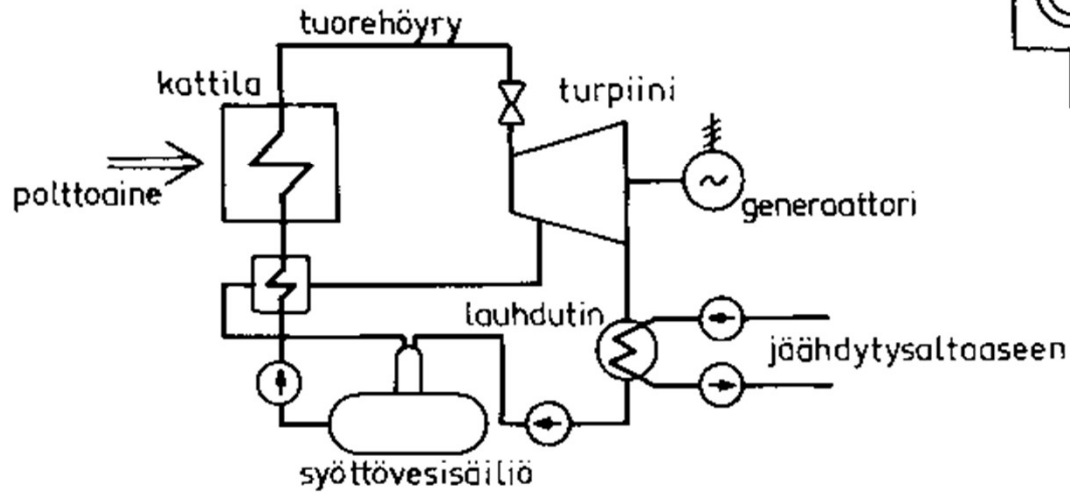
Nopea häiriöreservi

aktivoidaan
manuaalisesti
siirtojen
palauttamiseksi:
kotimaiset
varavoimalaitokset
ja irtikytkettävät
kuormat



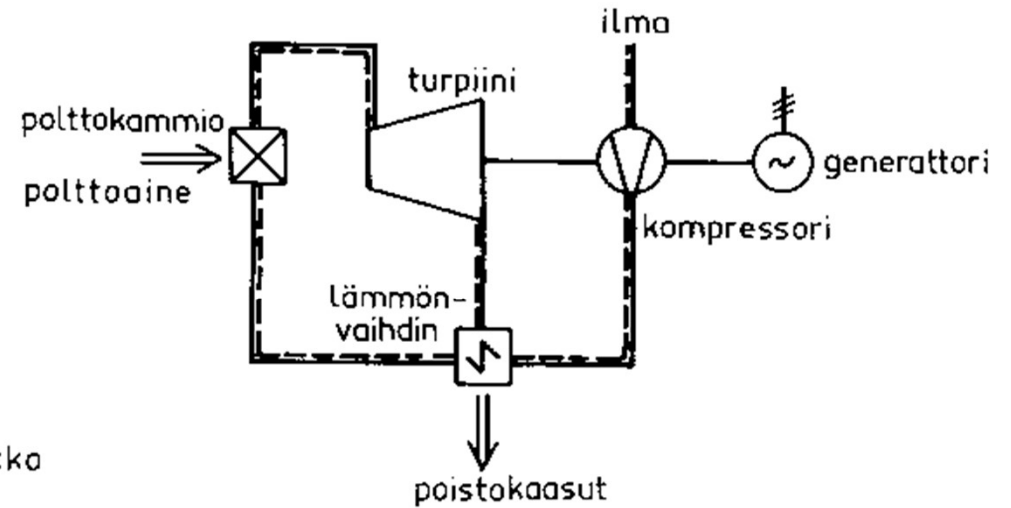
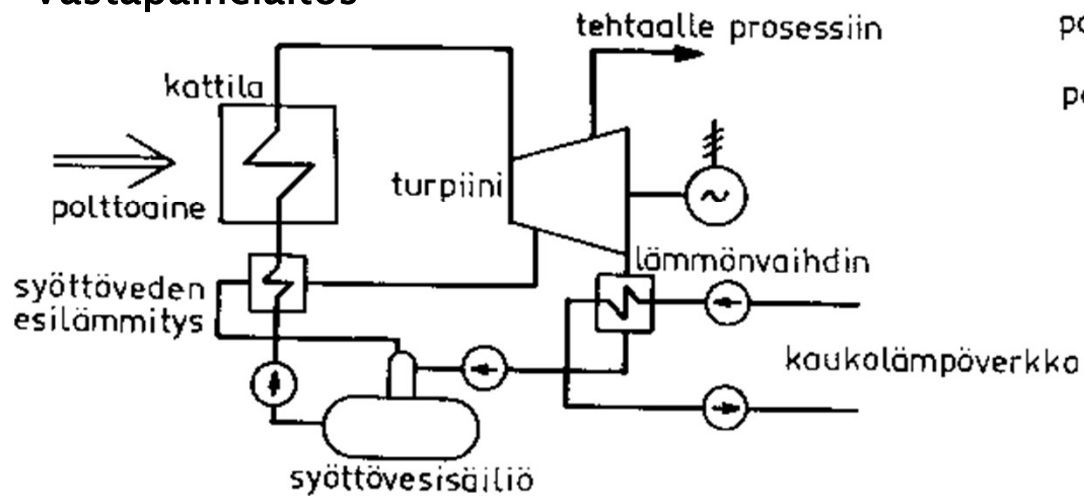
Voimalaitosten ominaisuudet

Lauhdevoimalaitos (fossiilinen polttoaine)



Lauhdevoimalaitos (painevesireaktori)

Vastapainelaitos



Kaasuturbiinilaitos

PERINTEINEN HÖYRYVOIMALAITOS

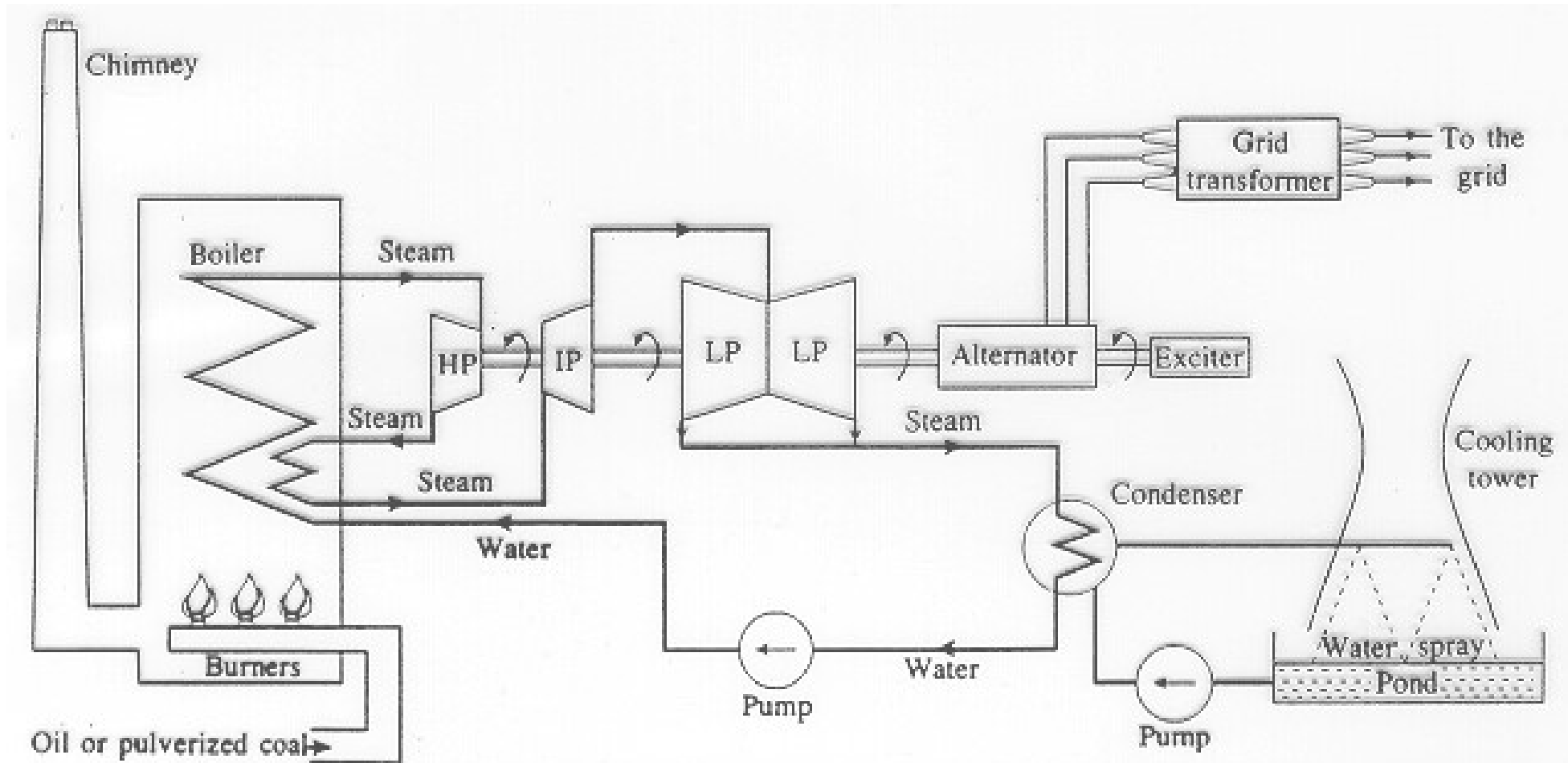
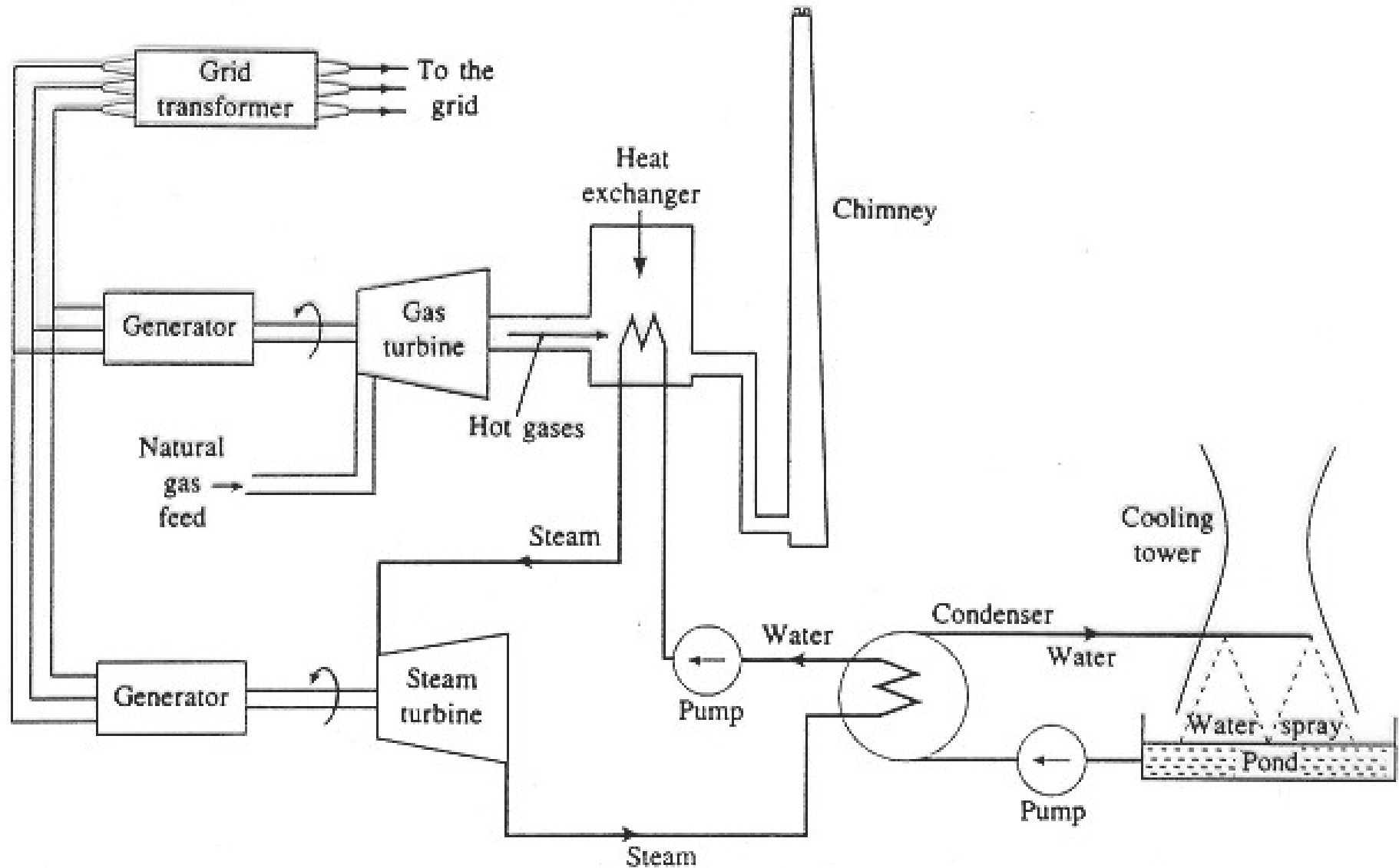


Figure 7.1 Schematic diagram of a coal- or oil-burning power station. HP, IP and LP are the high-pressure, intermediate-pressure and low-pressure turbines respectively

Kombivoimalaitos



Kombivoimalaitosten ominaisuuksia

Yksi generaattori kaasuturbiinin perässä, toinen höyryturbiinin

Kaasuturbiinin hukkalämpö hyödynnetään höyryn tuotannossa

SO₂ ja NO_x - emissiot paremmin hallinnassa kuin perinteisissä voimalaitoksissa

Vastapaineikäytössä termien hyötysuhde on erittäin hyvä. Sähkön ja lämmön suhde noin 50/50

YDINVOIMALAITOKSET

Painevesi- ja kiehutusvesireaktori

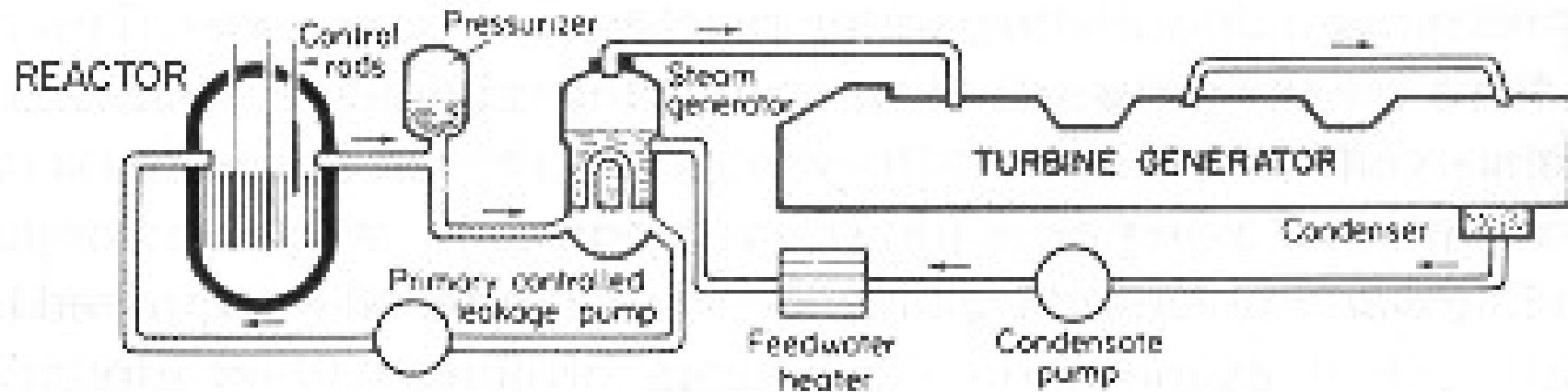


Figure 1.17 Schematic diagram of a pressurized water reactor. (Permission of Edison Electric Institute.)

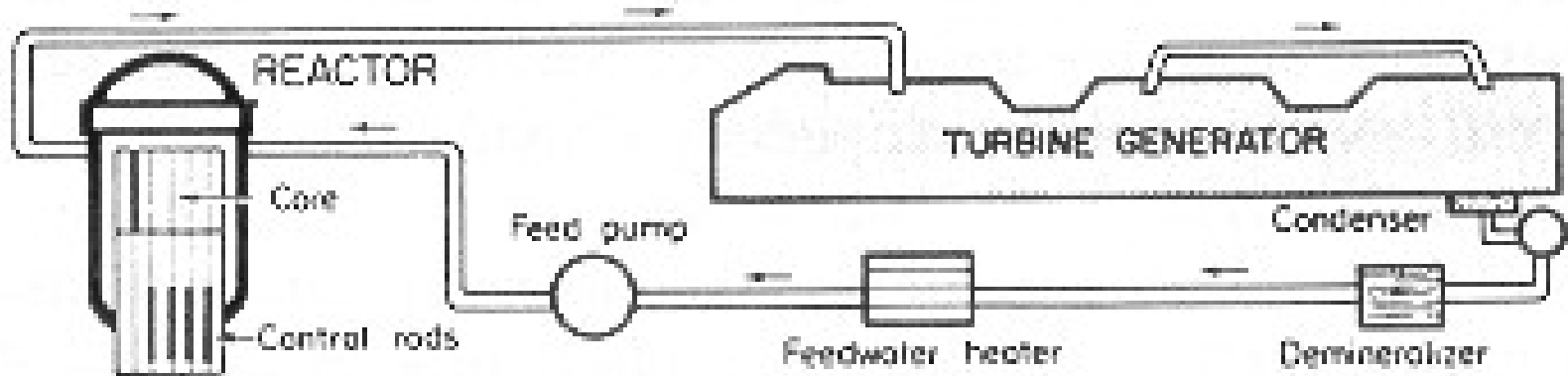


Figure 1.18 Schematic diagram of a boiling water reactor. (Permission of Edison Electric Institute.)

YDINVOIMALAITOSTEN OMINAISUUKSIA

Reaktoria lukuunottamatta perinteisiä höyryvoimalaitoksia

Kalliit investoinnit & halpa polttoaine => peruskuormalaitoksia

Ei emissioita: CO₂, SO₂, tai NO_x

Käytetyn polttoaineen jälkikäsittely ja loppusijoitus

Nykyiset laitokset perustuvat U-235:n fissioon (0,7%
luonnonuraanista 235:ttä)

Hyötöreaktori: U-238 muunnetaan plutoniumiksi

Fuusioenergia: $D+T=He+n$ tai $D+D=T+H$ tai $D+D=He+n$

Aurinkoenergia

- Auringon säteily avaruudessa on jopa $1\,366\text{ W/m}^2$
- Maan pinnalla säteily on vaimeampaa useasta syystä johtuen, ilmakehä absorboi säteilyä ja säteily myös heijastuu partikkeleista
- Avaruuden säteilystä maan pinnalle päätyy 5-70 %
 - Riippuu vuoden ja vuorokauden ajasta
 - Paikasta maapallolla
 - Suomessa auringon vuosittainen säteilyn määrä on n. $1\,000\text{ kWh/m}^2$
- Tunnin aikana maapallon pinnalle tulee auringon säteilyenergiaa enemmän kuin koko ihmiskunta kuluttaa energiaa vuodessa

Aktiiviset järjestelmät

- Perustuvat piipohjaisiin puolijohteisiin
- N-tyypin puolijohteessa ylimäärä elektroneja, jotka liikkuvat, esim. fosfori-atomeja
- P-tyypin puolijohteessa aukkoja, puuttuvia elektroneja, esim. Boori

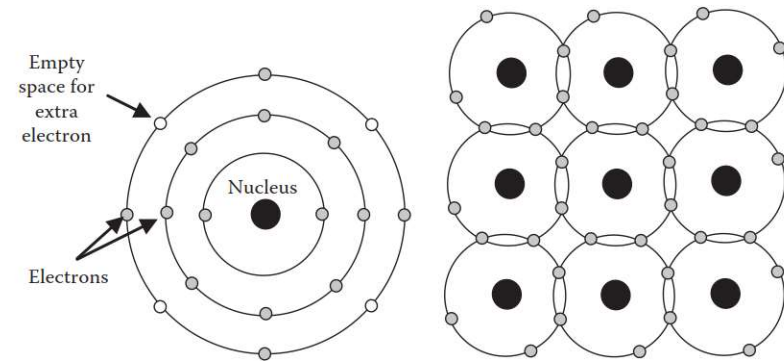


Figure 6.8 Silicon: atom and its crystal structures.

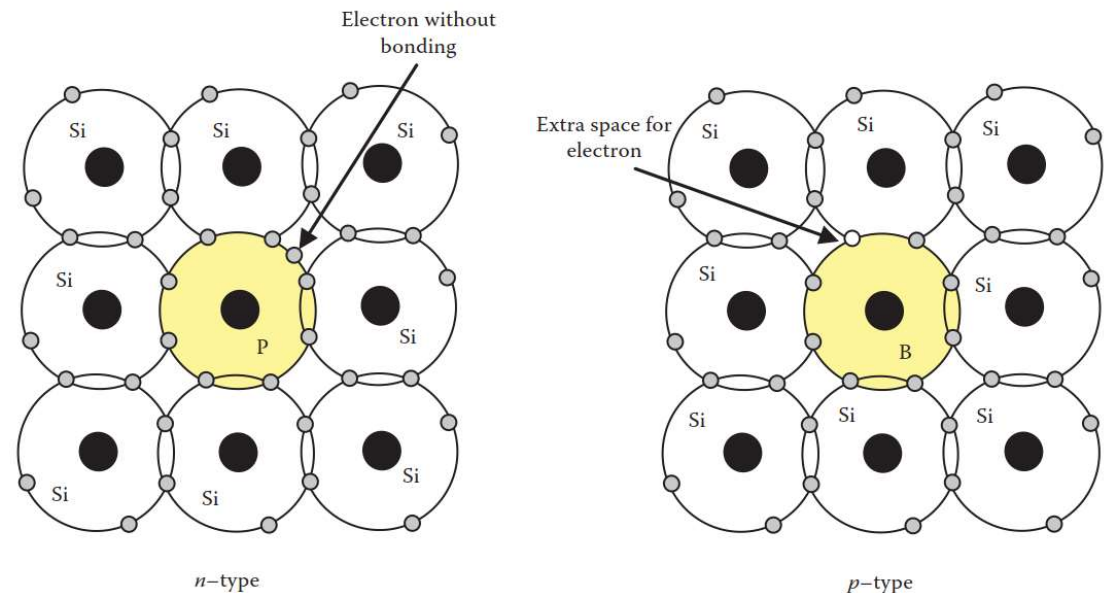


Figure 6.9 Silicon (Si) doped with phosphorus (P) and boron (B).

Aurinkokenno

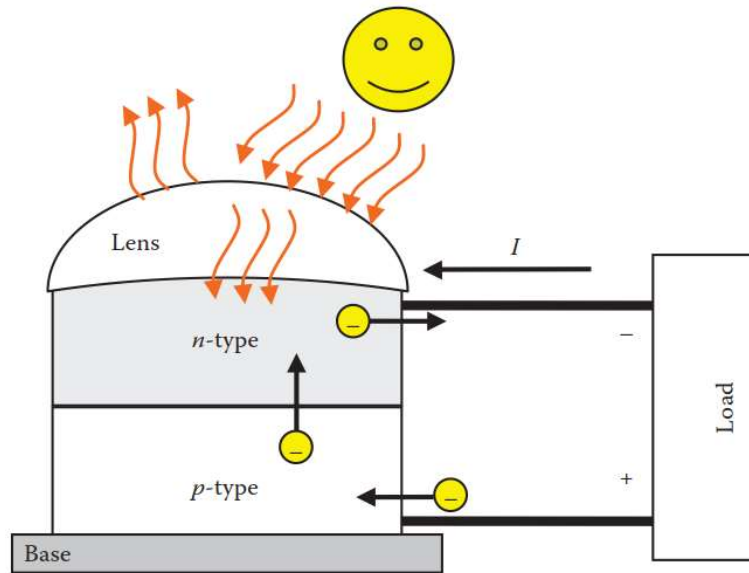


Figure 6.10 Concentrating PV cell.

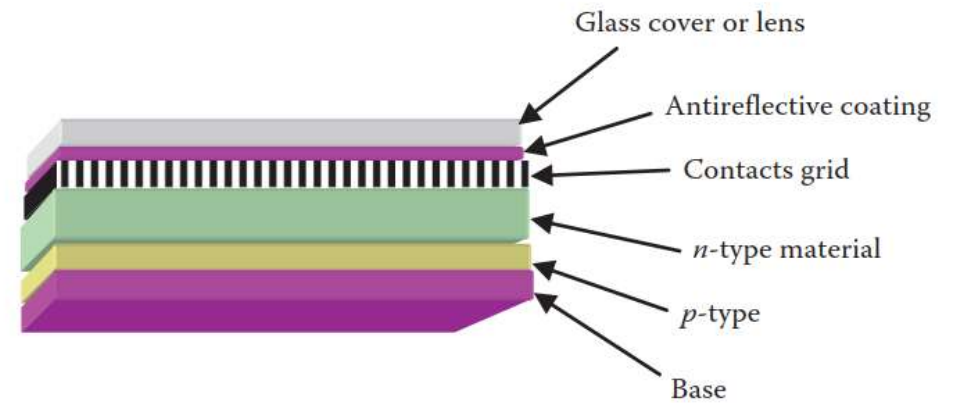


Figure 6.11 Main parts of PV cell.

P-N -liitos ja diodin toiminta

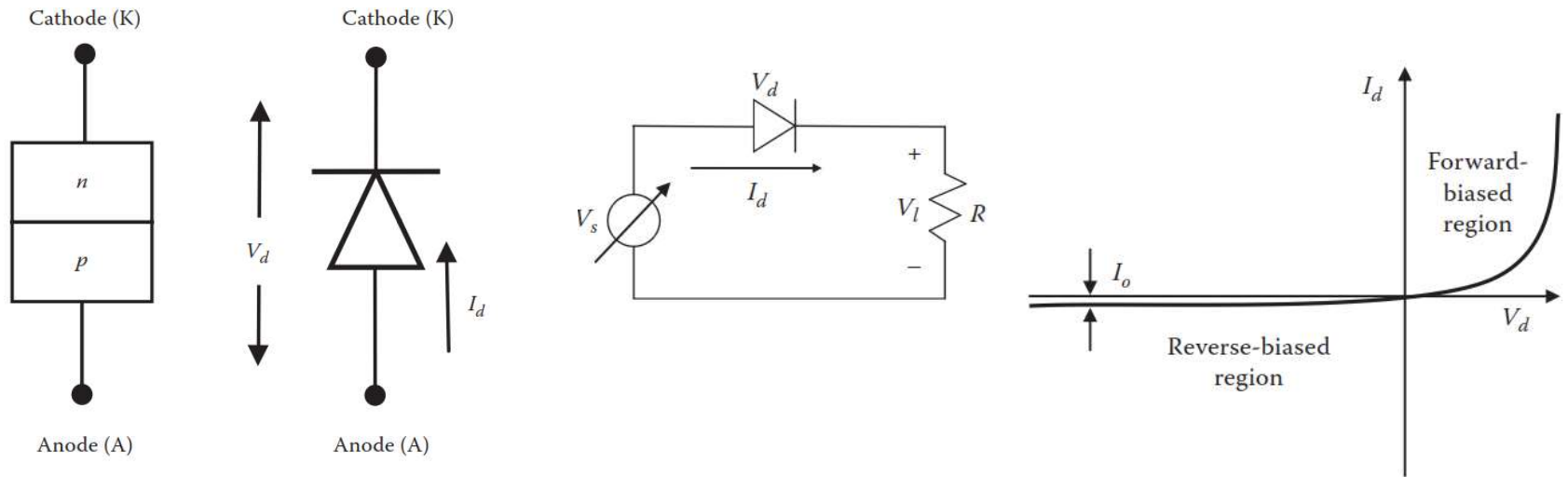


Figure 6.12 Representation of a p - n junction diode.

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right)$$

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

I_o is the reverse saturation current of the diode

V_d is the voltage across the diode

V_T is thermal voltage

q is the charge of one electron which is known as the elementary charge constant ($1.602 \times 10^{-19} \text{C}$)

T is the absolute temperature in kelvin (K); to convert from Celsius to kelvin, 273.15 is added to the Celsius value

k is the Boltzmann's constant ($1.380 \times 10^{-23} \text{J/K}$)

Ideaalinen aurinkokenno

- Aurinkokenno voidaan mallintaa virtalähteenä I_s ja sen rinnalle kytketyllä diodilla, jolloin kennon virta kuormaan on $I = I_s - I_d$
- Aurinkokennon jännite on sama kuin diodin päästöjännite eli varsin matala, noin 0,6-0,7 V

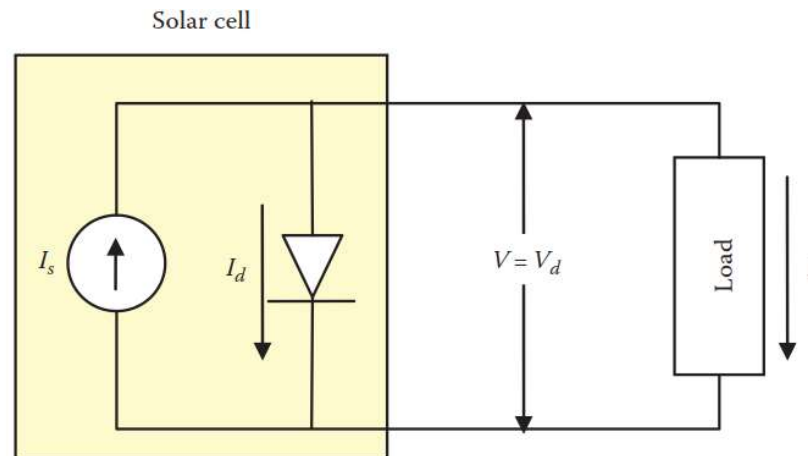


Figure 6.15 Modeling of ideal cell with current source.

Kennon virta-jännite-ominaiskäyrä

- Aurinkokenno on virtalähde rajoitetulla jännitealueella

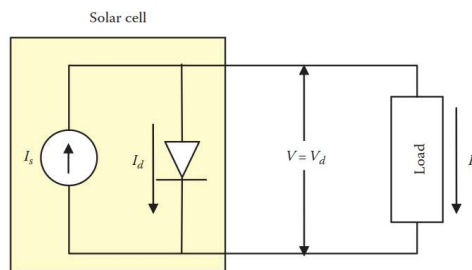


Figure 6.15 Modeling of ideal cell with current source.

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right)$$

$$V = V_d$$

$$I = I_s - I_d$$

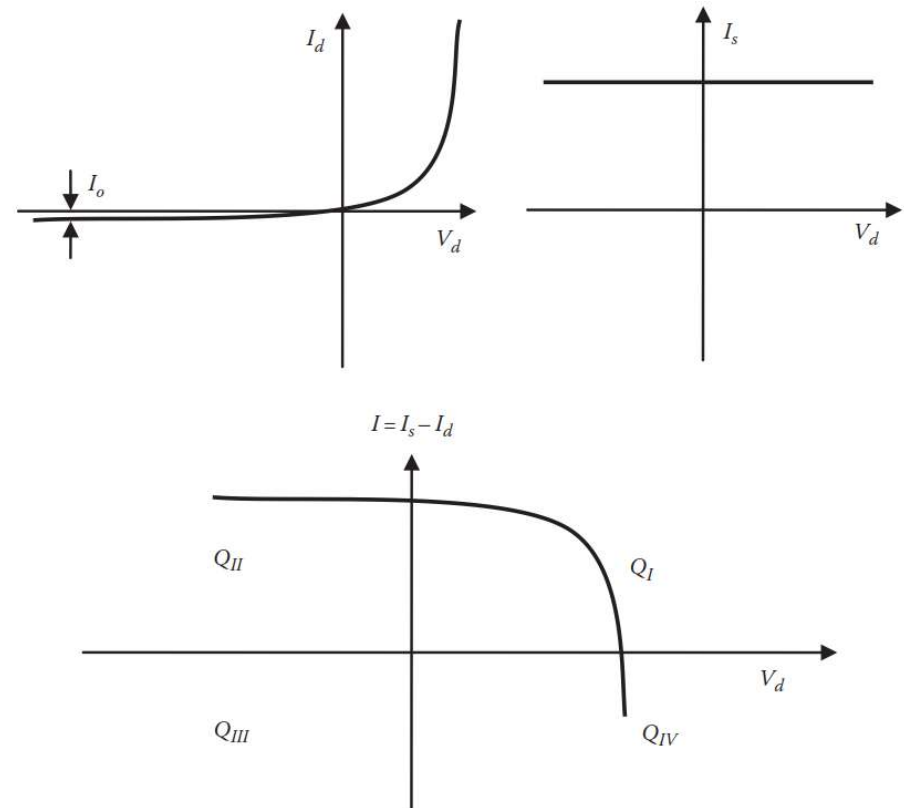


Figure 6.16 Current-volt characteristics of the PV cell.

I_o is the reverse saturation current

V_d is the voltage across the diode which is the same as the voltage across the load

V_T is the thermal voltage whose value is given in Equation 6.4

Maksimitehon piste, maximum power point, MPP

- Teho saadaan kertomalla jännite ja virta

$$P = VI = V_d I_s - V_d I_o \left(e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right)$$

- Teholla on maksimipiste ja kennoa pitäisi käyttää tässä pisteessä, jotta auringon säteilystä saataisiin maksimi hyöty

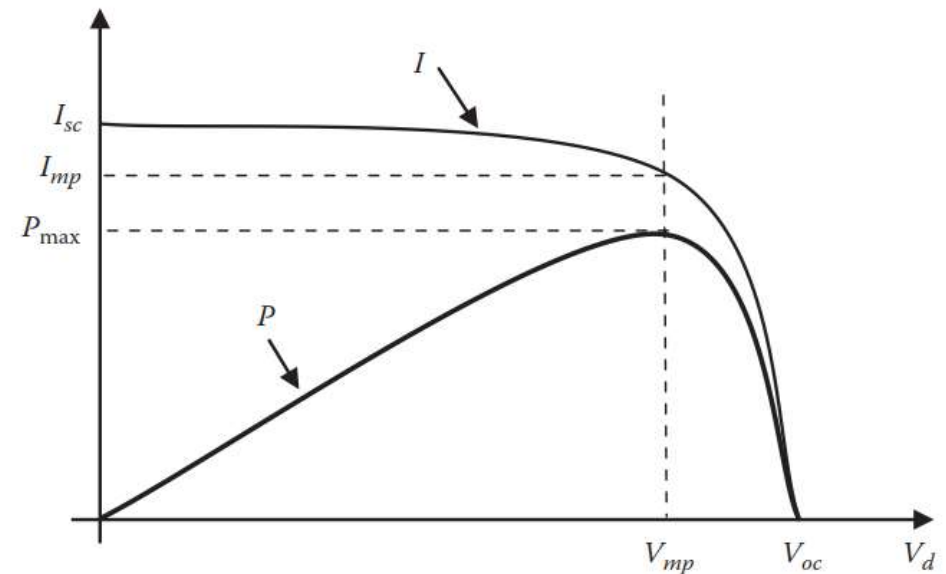


Figure 6.17 Current–voltage and power–voltage characteristics of PV cell.

Todellisen aurinkokennon malli

- Aurinkokennojen hyötysuhde on tyypillisesti alle 20 %, mutta laboratorio-olosuhteissa parhaat 40-50 %
- Säteilyyn liittyvät häviöt $\eta_{\text{irradiance}}$, heijastukset kennon pinnasta tai osa fotoneista ei ole riittävän suurienergisiä irrottamaan elektronia
- Sähköiset häviöt η_e , erilaiset resistiiviset häviöt johdotuksista ja puolijohdemateriaaleista on mallinnettu kahdella resistanssilla

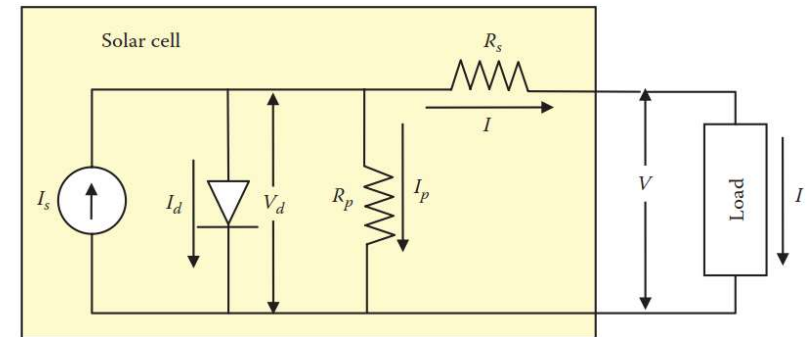


Figure 6.32 Model of real PV cell.

$$I = I_s - I_d - I_p \qquad V = V_d - IR_s$$

$$\eta_{\text{irradiance}} = \frac{P_{se}}{P_s} = \frac{V_d (I_s - I_d)}{\rho A} \qquad \eta_e = \frac{P_{out}}{P_{se}} = \frac{VI}{V_d (I_s - I_d)}$$

$$\eta = \eta_{\text{irradiance}} \eta_e = \frac{P_{se}}{P_s} \frac{P_{out}}{P_{se}} = \frac{P_{out}}{P_s} = \frac{VI}{\rho A}$$

P_{se} is solar power converted to electricity

P_s is solar power reaching the solar cell

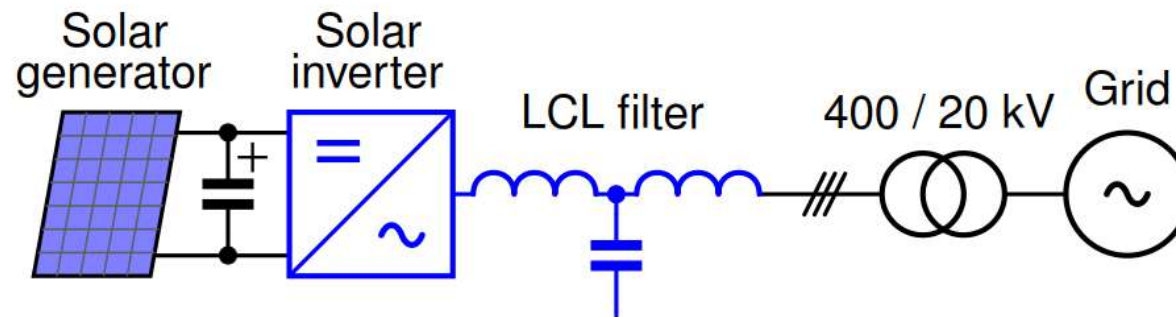
P_{out} is the output power of the solar cell that is consumed by the load

ρ is the solar power density at the surface of the cell

A is the area of the PV cell facing the sun

Sähköverkkoon liitetyt aurinkosähköjärjestelmät

- Aurinkopaneelit tuottavat tasajännitteen
- DC-kiskoston jännite nostetaan suhteellisen korkeaksi, jotta verkkoon liityntä onnistuu, tyypillisesti 600-850 VDC
- Kennoja kytketään sarjaan ja lisäksi voidaan käyttää dc-dc-katkoja jännitteen nostoon ja lisäksi niillä voidaan toteuttaa maksimitehopisteen seuranta
- Tehoelektroniikka käsitellään tarkemmin luvussa 10

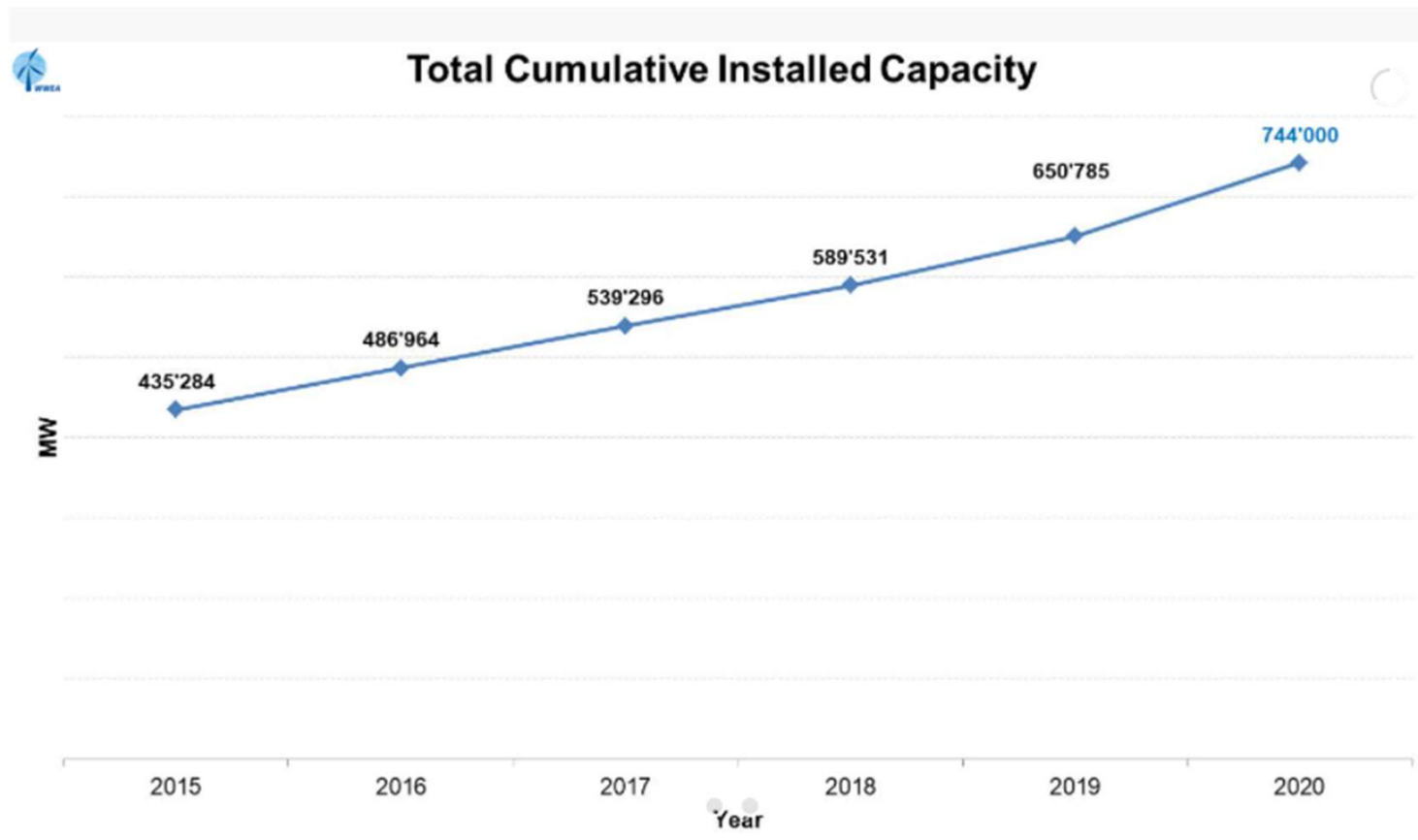


Tuulienergia

- Käytetty jo tuhansia vuosia mm. purjehduksessa, noin 5000 sitten Egyptissä
- Ensimmäiset tuulimyllyt noin 3000 BC Kiinassa ja sen jälkeen Babyloniassa
- Ensimmäisen tuuliturbiinin rakensi Charles F. Brush 1888
- Suurimmat tuulivoimalat ovat nykyään jopa 8 MW

World Wind Energy Association

- <https://wwindea.org/information-2/information/>

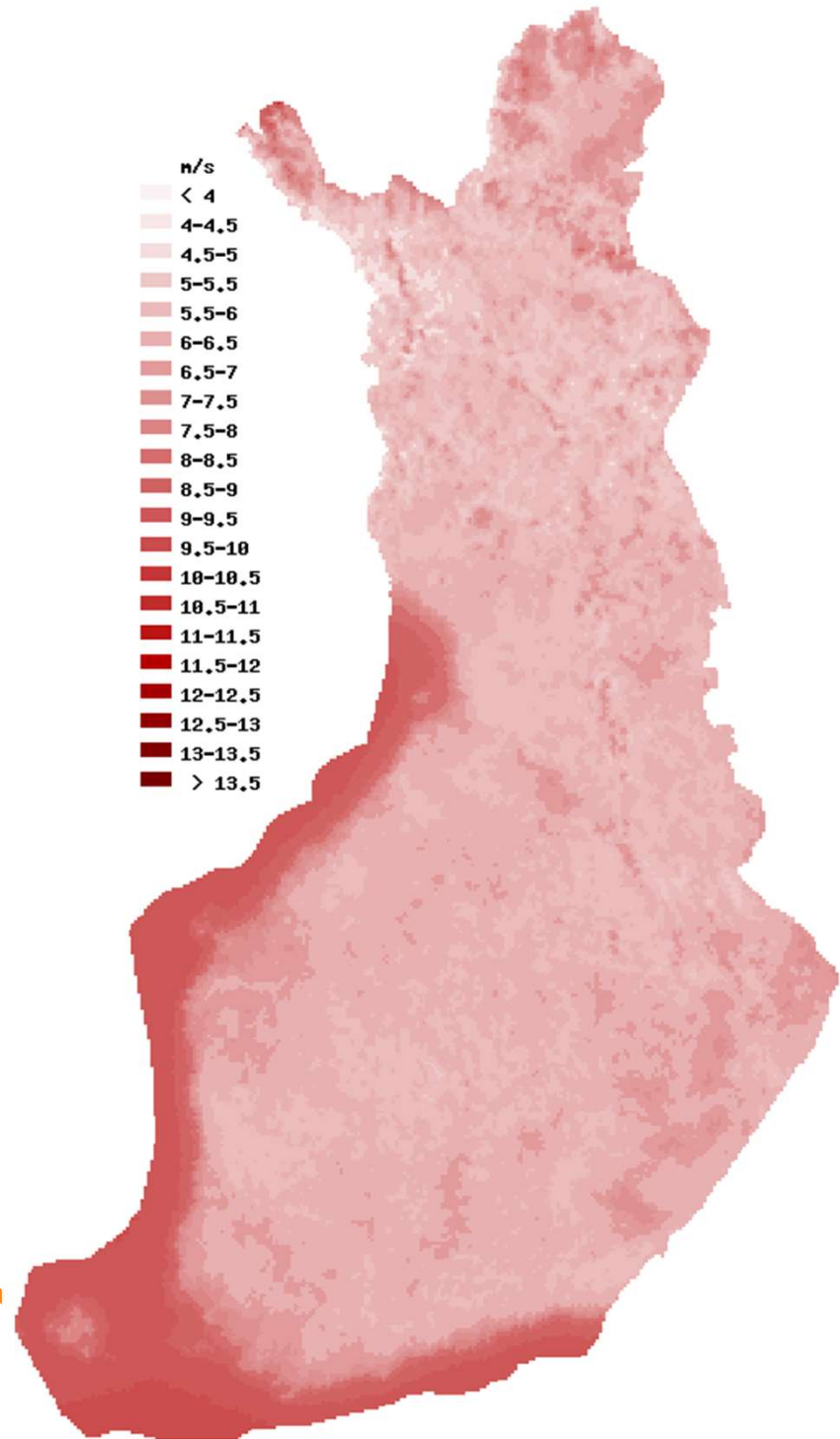
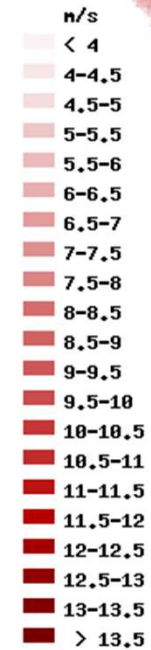


Maailman top 11 maata

Country/Region	2020	New Capacity 2020	2019	2018
China*	290'000	52'000	237'029	209'529
United States	122'328	16'895	105'433	96'363
Germany	62'784	1'427	61'357	59'313
India	38'625	1'096	37'529	35'129
Spain	27'446	1'638	25'808	23'494
United Kingdom	24'167	652	23'515	20'743
France*	17'949	1303	16'646	15'313
Brazil	18'010	2'558	15'452	14'707
Canada	13'588	175	13'413	12'816
Italy*	10'850	280	10'512	9'958
Turkey	9'305	1'249	8'056	7'369
Rest of the World*	110'000	14'000	96'035	84'814
Total*	744'000	3'000	650'785	589'547

Suomen tuuliatlas

- <http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html>



- **Tuotanto roottorin pyyhkäisyypinta-alaa kohti (kWh/m²):**
 - Tuotanto roottorin pyyhkäisyypinta-alaa kohden kertoo, kuinka paljon energiaa on tuotettu roottorin pinta-alaan nähden.
 - Nyrkkisääntönä on, että voimala on tuottanut hyvin, mikäli vuosituotannosta laskettu luku on yli 1000k Wh/m².
- **Huipunkäyttöaika th (h):**
 - Tuulivoimaloiden energiantuotanto vaihtelee välillä 0 % - 100 % nimellistehosta.
 - Th kuvaa sen ajan pituutta, joka kuluisi vuodessa tuotetun energian tuottamiseen, mikäli tuulivoimala toimisi koko ajan nimellistehollaan
 - Esimerkiksi 2500 tunnin huipunkäyttöaika sitä että laitos on tuottanut vuoden aikana energiamäärän, jonka laitos tuottaisi toimiessaan nimellistehollaan 2500 tuntia
 - Mikäli tuulivoimalan vuotuinen huipunkäyttöaika on yli 2400 tuntia, on laitos tuottanut hyvin.
- **Kapasiteettikerroin CF:**
 - Kapasiteettikerroin CF kertoo huipunkäyttöajan suhteessa vuoden tunteihin ja se kuvaa siten oleellisesti samaa asiaa kuin huipunkäyttöaika
 - Kapasiteettikerroin on käytössä erityisesti englanninkielisessä kirjallisuudessa

Määritelmiä (2/2)

- **Tuotantoindeksi IL (%)**
 - Tuotantoindeksi on sääasemilla mitattujen tuulennopeushavaintojen perusteella laskettu tuotanto suhteessa pitkän aikavälin havainnoista laskettuun keskimääräiseen tuotantoon
 - Suomen tuulivoimatilastoissa keskimääräinen tuotanto on tällä hetkellä laskettu vuosien 1987 - 2001 tuulennopeushavainnoista.
 - Tuulennopeushavainnot muutetaan keskitehoksi käyttäen 1500 kW tuulivoimalaitoksen tehokäyrää ja huomioiden ilman tiheyden vaikutus tehontuotantoon
 - Tuotantoindeksiä tarvitaan kun halutaan selvittää, kuinka tuulinen jokin tietty ajanjakso oli suhteessa pitkän aikavälin keskimääräiseen tuulisuuteen. Asia on erityisen tärkeä tuulivoimainvestointien yhteydessä, jolloin on selvitettävä mikä on tuotantoennuste voimalahankkeen eliniän ylitse.

Tuulen liike-energia ja teho

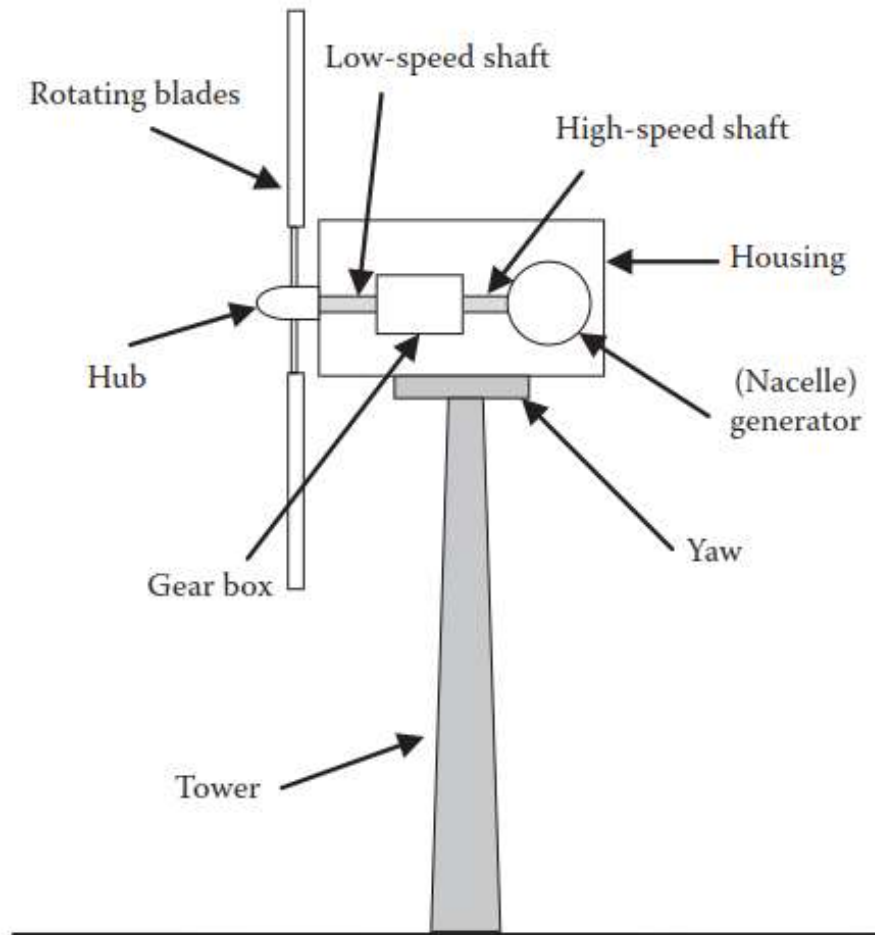
- Tuulen liike-energia $KE = \frac{1}{2}mw^2$ $KE = \frac{1}{2}A\delta tw^3$
 - m , massa
 - w , nopeus m/s
 - δ , ilman tiheys kg/m³
 - t , aika

- Teho $P_{wind} = \frac{KE}{t} = \frac{1}{2}A\delta w^3$

Tuulivoimalan osat



(a)



(b)

Figure 6.39 Basic components of a wind-generating system: (a) horizontal design and (b) main parts.

Tuuliturbiini

Wind Turbine

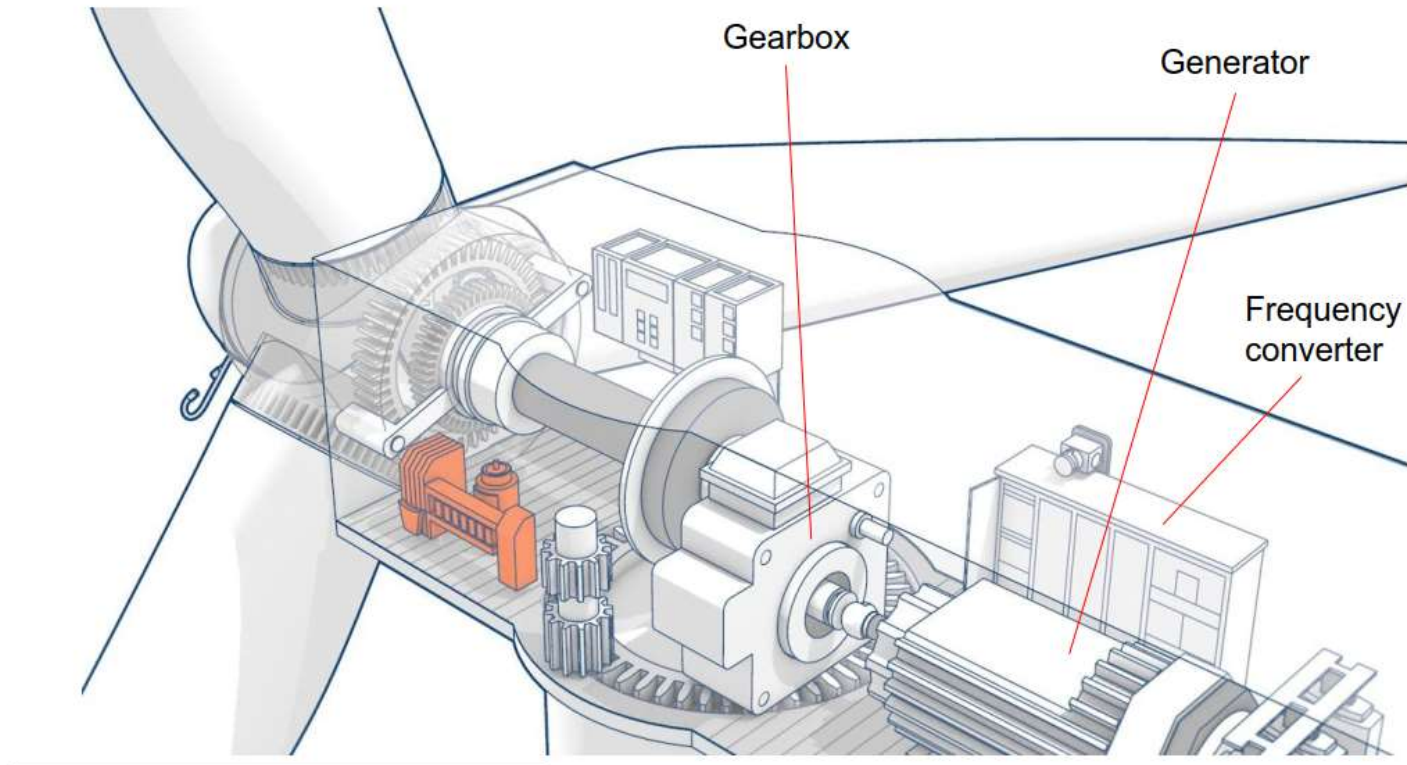


Figure: ABB (modified)

Kohtaamiskulma, α

F_L , nostovoima, lift force
 F_D , työntövoima, drag force

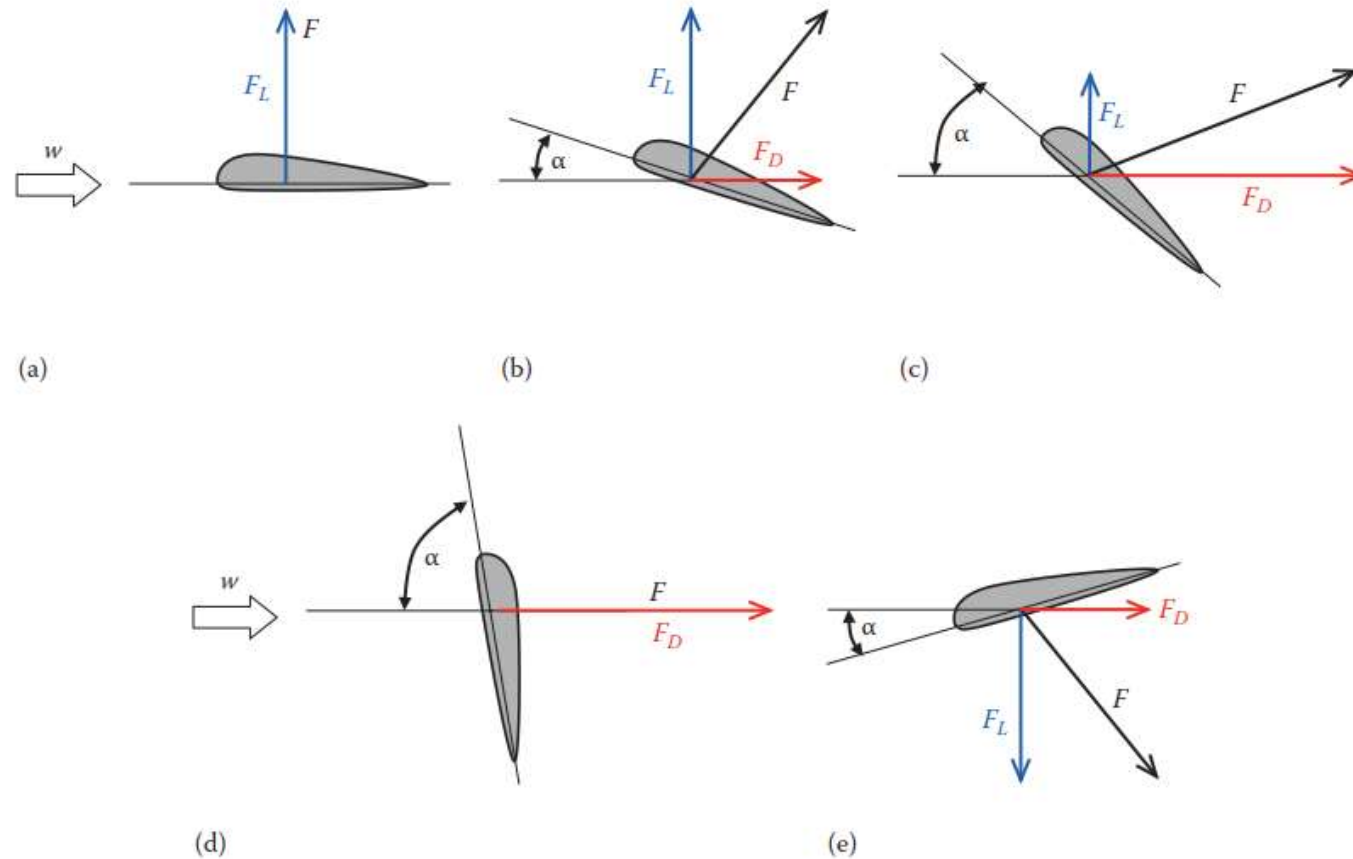


Figure 6.46 Aerodynamic forces and angle-of-attack: (a) horizontal position—all aerodynamic force is lift; (b) positive angle-of attack—aerodynamic force has lift and drag; (c) increasing positive angle-of attack, less lift, and more drag; (d) increasing positive angle-of attack until aerodynamic force is all drag; and (e) negative angle-of attack—lift is reversed.

Nostovoima ja lapakulma β

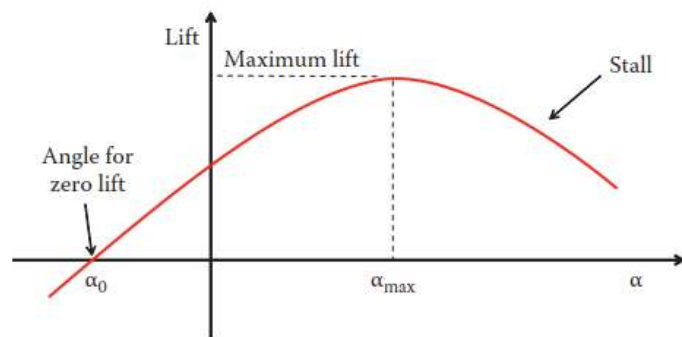


Figure 6.47 Lift force as a function of angle-of-attack.

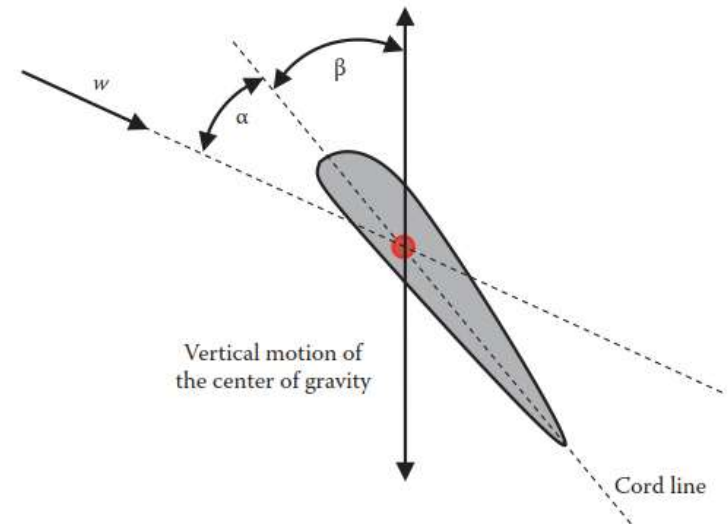


Figure 6.48 Relative wind speed, angle of attack and pitch angle.

Lähtöteho pyörimisnopeuden funktiona

- Alkunopeus (cut-in speed) w_{\min}
- Nopeuden w_B jälkeen turbiinin tehoa on rajoitettava säätämällä lapakulmaa, jotta turbiini nimellisteho ei ylitä

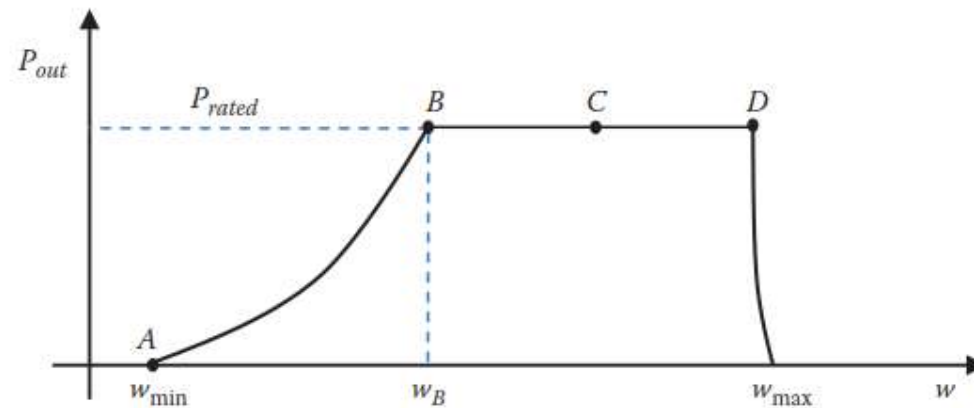


Figure 6.50 Output power of wind turbine.

Kärkinopeus ja nopeussuhde

Tip speed ratio, TSR

$$v_{tip} = \omega r = 2\pi \frac{n}{60} r$$

$$TSR = \frac{v_{tip}}{w}$$

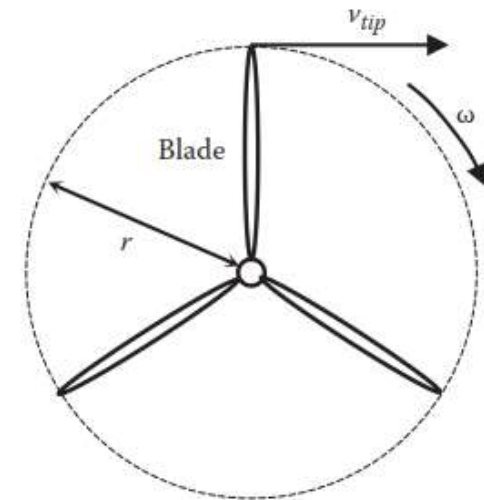


Figure 6.51 Tip velocity.

- v_{tip} kärjen nopeus (m/s)
- ω siiven kulmanopeus (rad/s)
- n kierrosnopeus (r/min)
- r siiven pituus (m)
- w tuulen nopeus

Tehokkuuskerroin

- Tehokkuus
- Kuvaa kuinka paljon tuulen tehosta muuttuu lapojen tehoksi
- Betzin raja, C_p on aina pienempi kuin 0,5926 ja käytännössä pienempi kuin 0,5
- Moderneissa tuuliturbiineissa TSR voidaan säätää optimaaliseksi säätämällä generaattorin nopeutta ja lapakulmaa

$$C_p = \frac{P_{blade}}{P_{wind}}$$

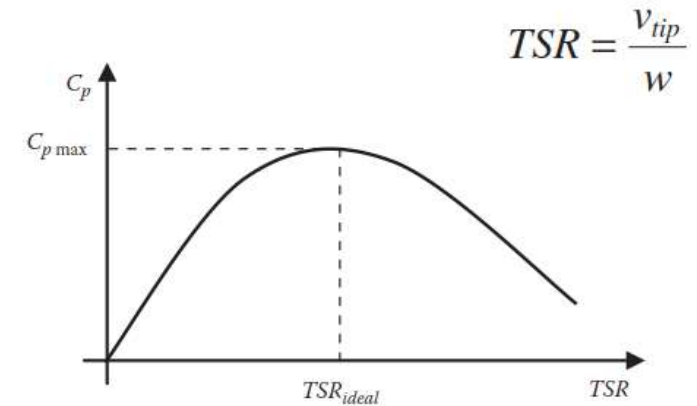


Figure 6.52 Coefficient of performance as a function of TSR.

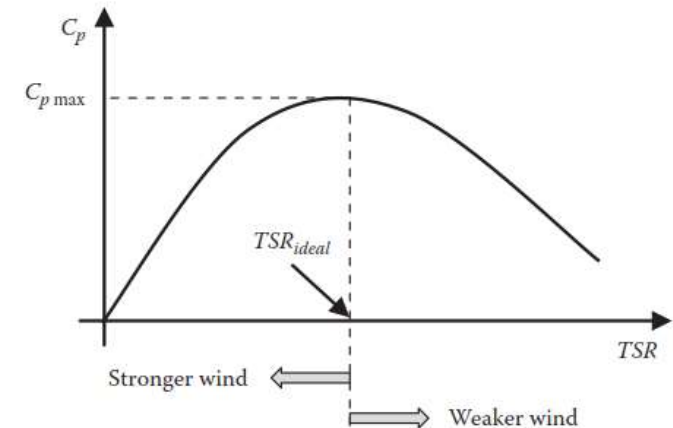


Figure 6.53 Tracking maximum C_p by adjusting the speed of the blade.

Kytöntä sähköverkkoon

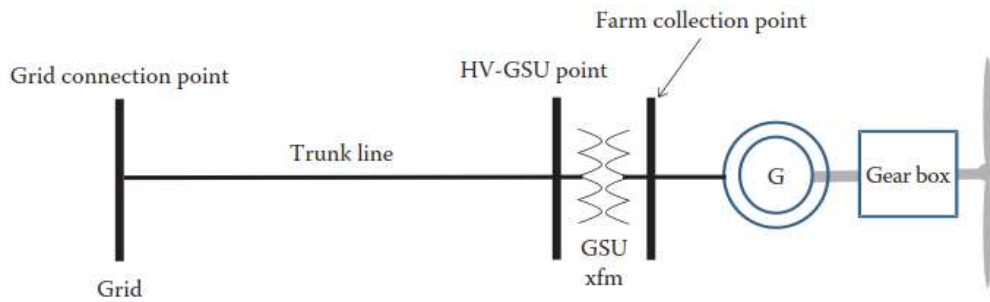


Figure 6.60 Type 1 wind turbine system.

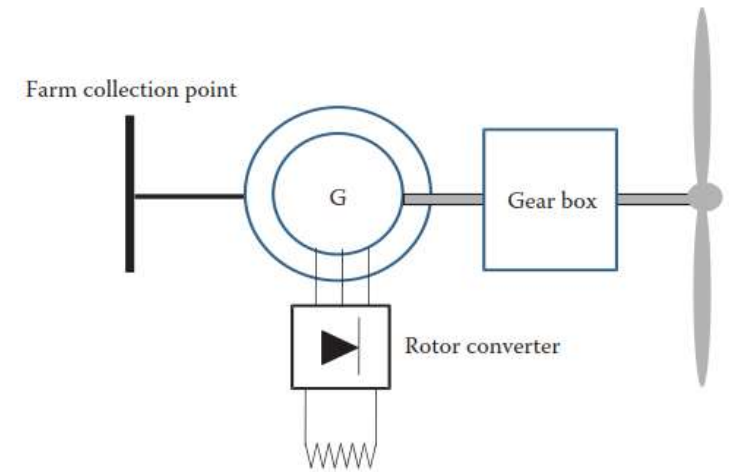


Figure 6.61 Type 2 wind turbine system.

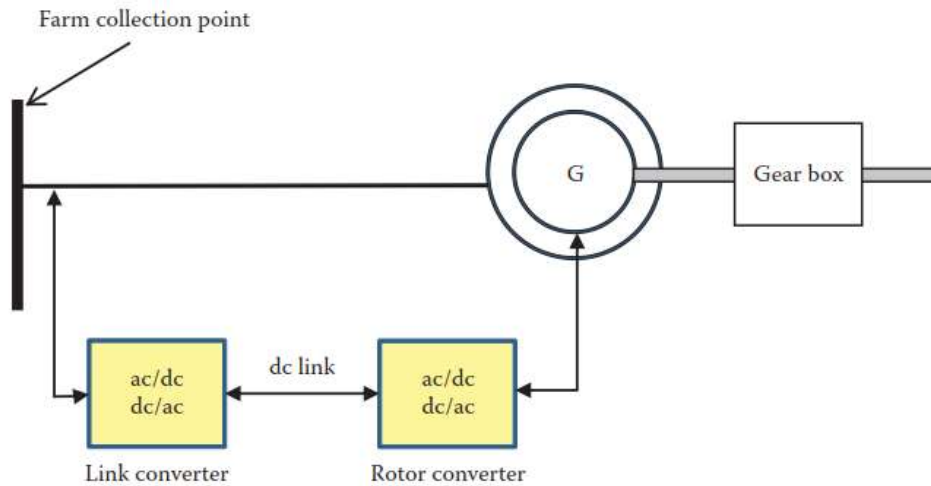


Figure 6.62 Type 3 wind turbine system.

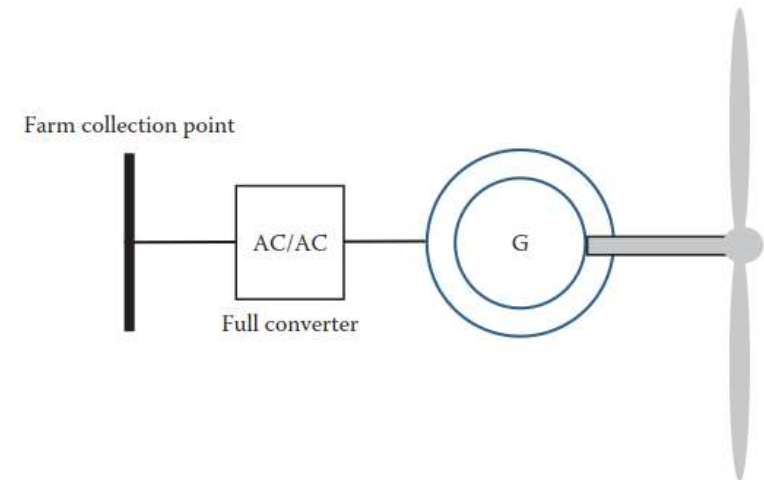


Figure 6.63 Type 4 wind turbine system.