

Föreläsningsmaterialet bygger
på material av:
Olov Samuelsson – Lund

TSFS17 Elkraftsystem

Fö 2 – Baskraft & generatoren

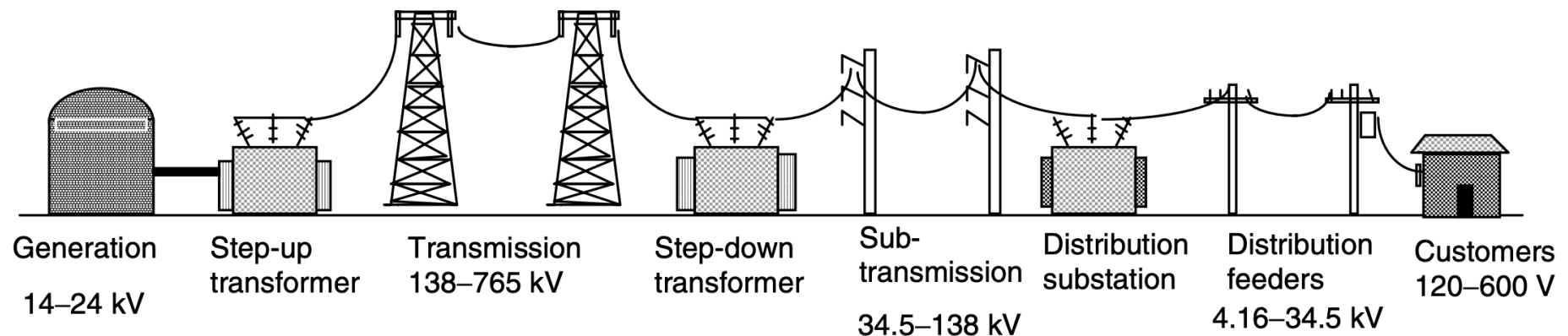
Lars Eriksson, professor
ISY, Fordonssystem

1. Baskraft i Sverige

Översikt

- Nyckeltal för kraftverk – för jämförelse av kraftslag
- Kraftslag
 - Värmekraft: kärnkraft och kraftvärme
 - Vattenkraft
 - Vindkraft
 - Solel
- Kraftslagen används olika
- Synkronmaskinen som generator
- Power units

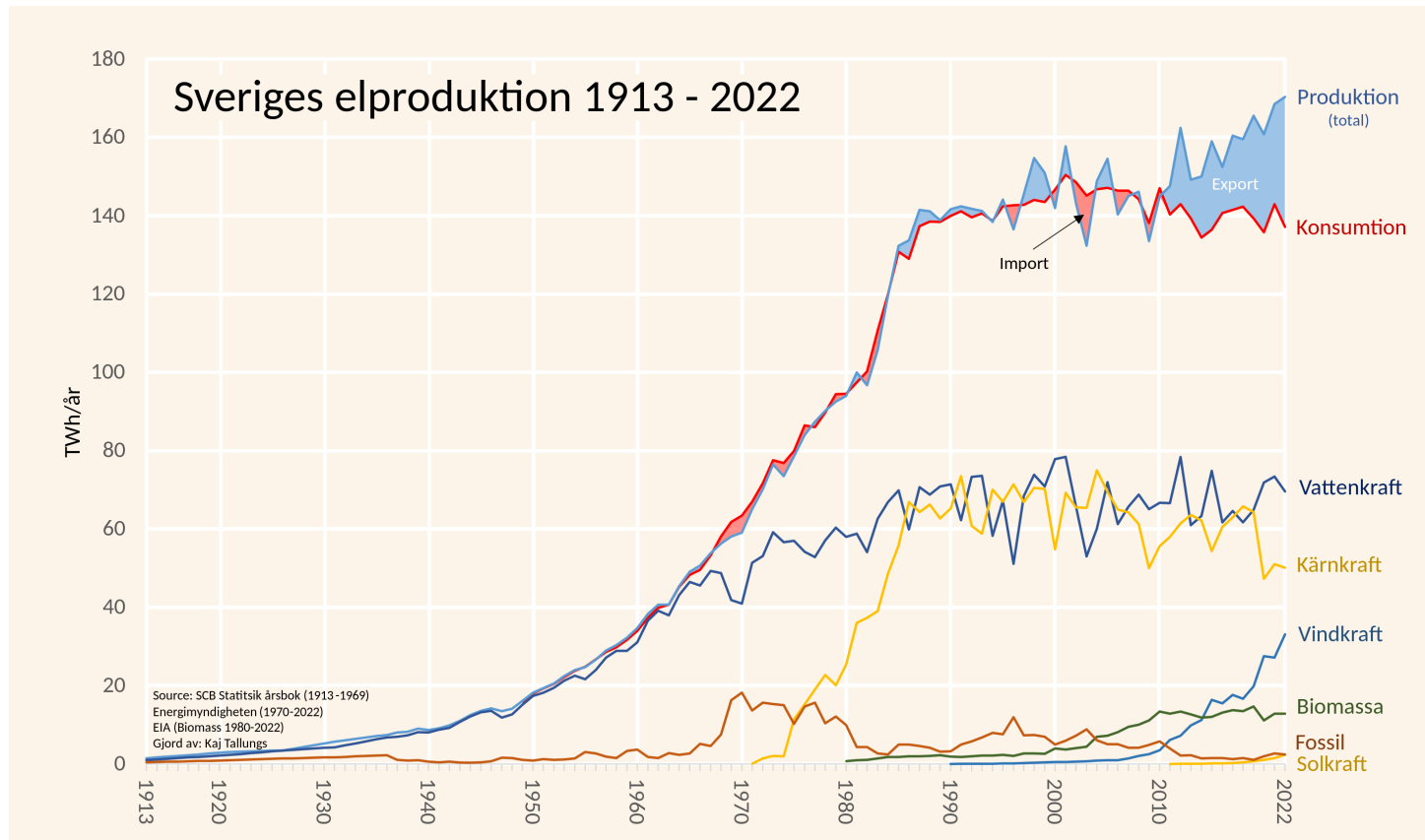
En-dimensionell bild av Elkraftsystemet



- Idag: Energikällorna och generatörn

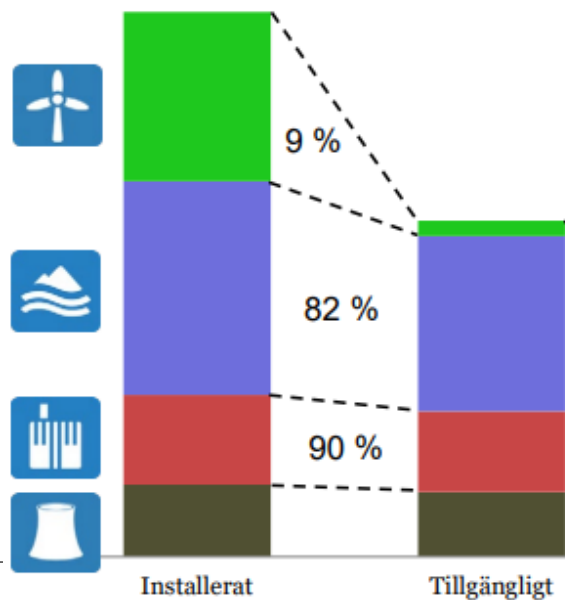
Sveriges Elproduktion - Historiskt

- Senaste 10 åren
- Konsumtion stilla
- Produktion ökar
- Export ökar



Effektvärde

- ”Effektfrågan”: Räcker elen vid timmen med högst behov?
- Max elförbrukning vintern 2022/2023 enligt Svenska Kraftnät
Normalvinter 26500 MW, tioårsvinter 27800 MW, tjugoårsvinter 28200 MW



Kraftslag	Inst effekt (MW)	Effektvärde (uppskattning Svk)	Antas tillgängligt (MW)
Vattenkraft	16300	82%	13400
Kärnkraft	6900	90%	6200
Vindkraft	14300	9%	1300
Gasturbiner	1500	0%	0
Kondens	900	90%	800
Kraftvärme, industri	1500	77%	1100
Kraftvärme, fjärrvärme	2900	77%	2200
Solkraft	2300	0%	0
Summa	46600	54%	25100

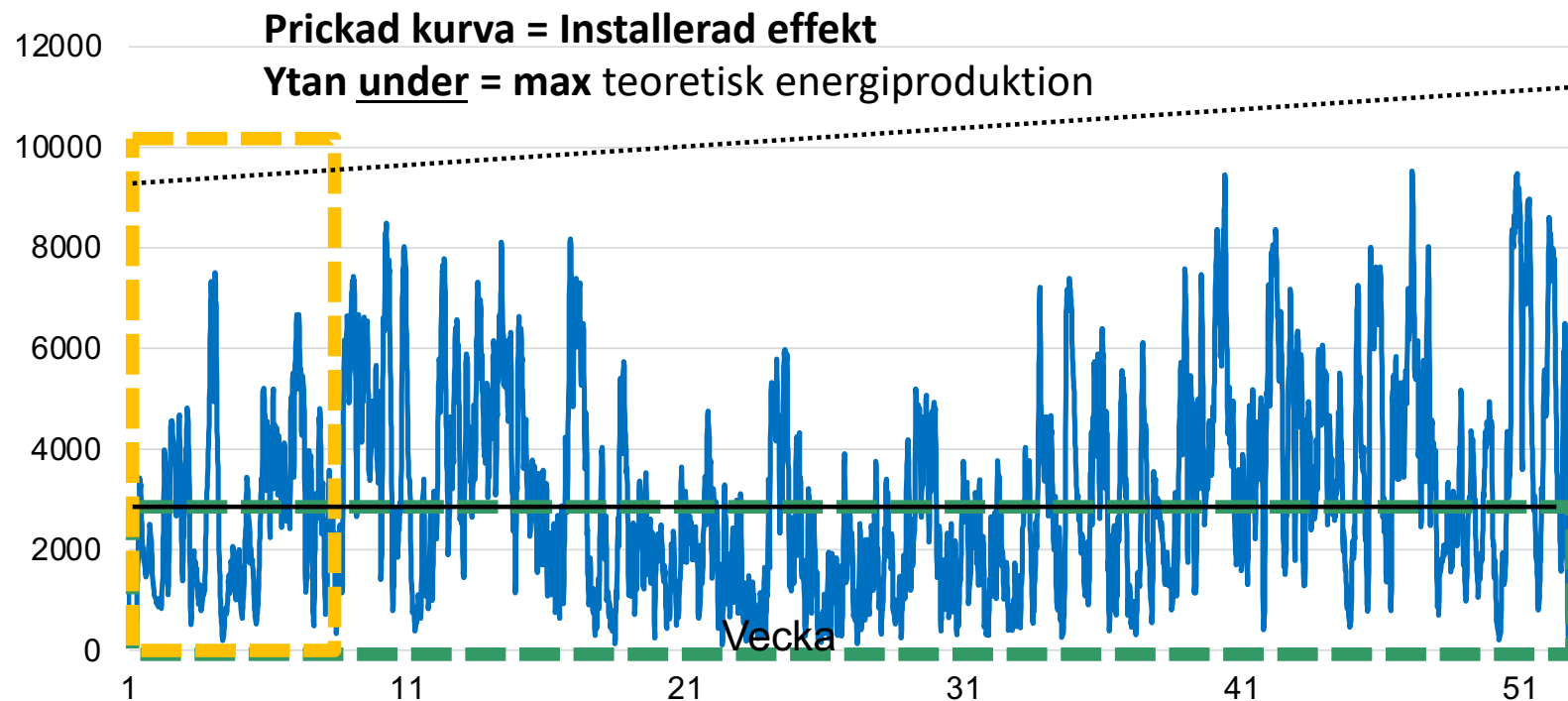
El från svensk vindkraft under 2021

Yta under blå kurva = Verklig **energiproduktion** 27 TWh

Energiproduktion = **Medeleffekt** · 8760 h → Medeleffekt = Energiproduktion/8760 h = 3100 MW

Energiproduktion = Installerad effekt · **fulleffekttimmar** → $T_{full} = \text{Energi} / P_{\text{installerad}} = 2455 \text{ h}$

Energitillgänglighet = Fulleffekttimmar/8760 h = 28 %



Nyckeltal för kraftverk



Energiproduktion per år (=8760 h) i MWh, GWh eller TWh



Installerad effekt i MW = Generatoreffekt = max elproduktion



Energitillgänglighet
(även Capacity factor)

Energiprod. per år = **Fulleffekttimmar/år** x installerad effekt
Energitillgänglighet = $\text{Fulleffekttimmar} / 8760$



Effektvärde = % av installerad effekt tillgänglig @ timmen på året med högst elbehov

Typiska värden för **en enhet** - Sverige

Sveriges årliga elkonsumtion 140 TWh

Installerad effekt · fulleffekttimmar/år = Energiproduktion per år

Kärnkraft	1000 MW	· 7000h = 7 TWh
Vattenkraft	100 MW	· 4000h = 0.4 TWh
Vindkraft (land)	9 MW	· 2700h = 0.024 TWh
Solel	0.1 MW	· 1000h = 0.0001 TWh

Vindkraft och solel har färre fulleffekttimmar än kärnkraft. Om vindkraft/solel ersätter kärnkraft måste den installerade effekten **höjas kraftigt** för oförändrad energiproduktion.



Värmekraftverk

- Ångkraftverk – vanligast globalt
 - Geotermi
 - Kondenskraftverk (fossileldat och kärnkraft)
 - Kraftvärmeverk ger el och fjärrvärme
- Gasturbinkraftverk
 - Snabbstartat men hög driftkostnad
 - Hjälpkraft kärnkraftverk och regionalt
- Gaskombikraftverk
 - Gasturbinens avgaser driver ångkraftverk
- Dieselkraftverk – Effektreserv, fartyg, backup: försörjer sjukhus

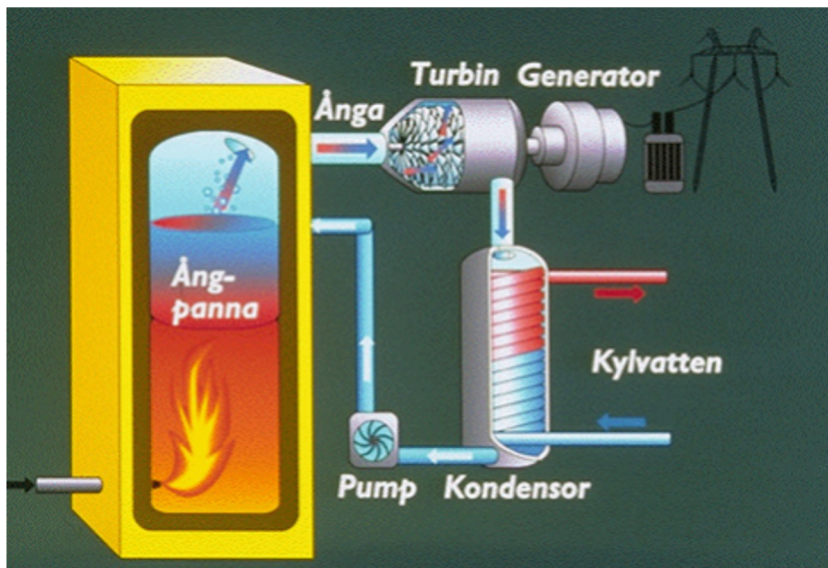
Ångkraftverk

- Ånga från marken
 - Geotermi
- ...eller från bränslen
 - Fossilt bränsle
 - Biobränsle
 - Uran (kärnkraft)
- Olika uppbyggnad
 - Kondenskraftverk
 - Kraftvärmeverk

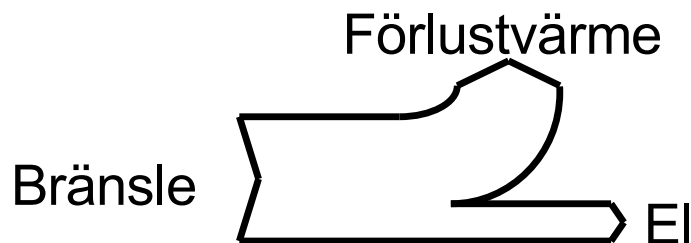
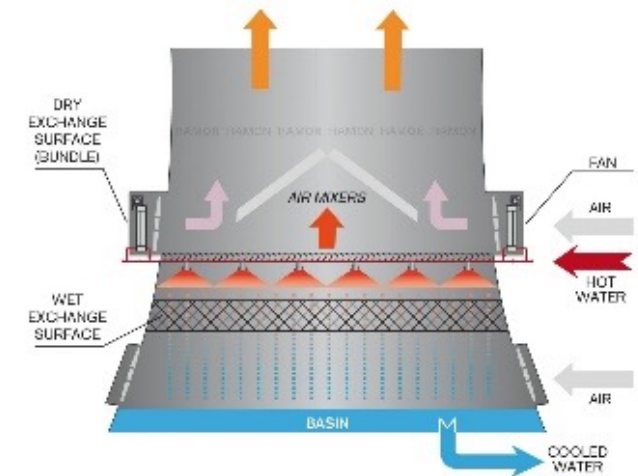


2x30 MW, Krafla, Island www.lv.is

Kondenskraftverk



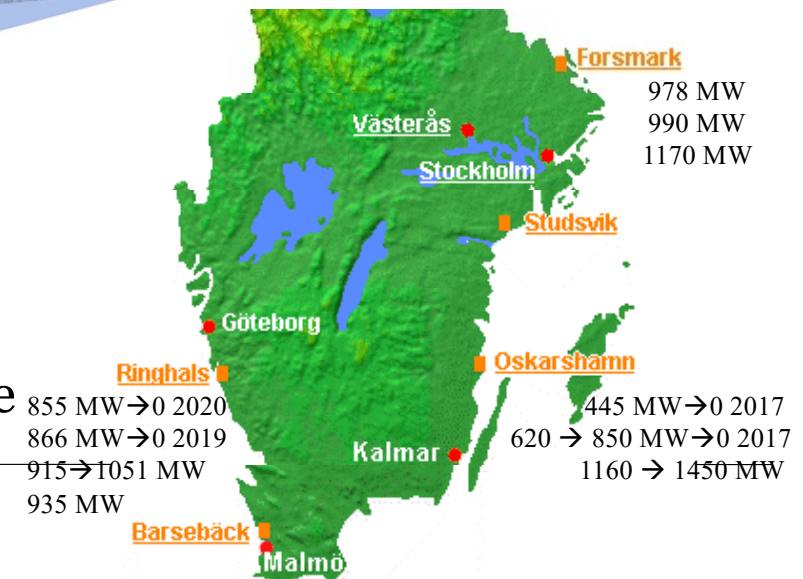
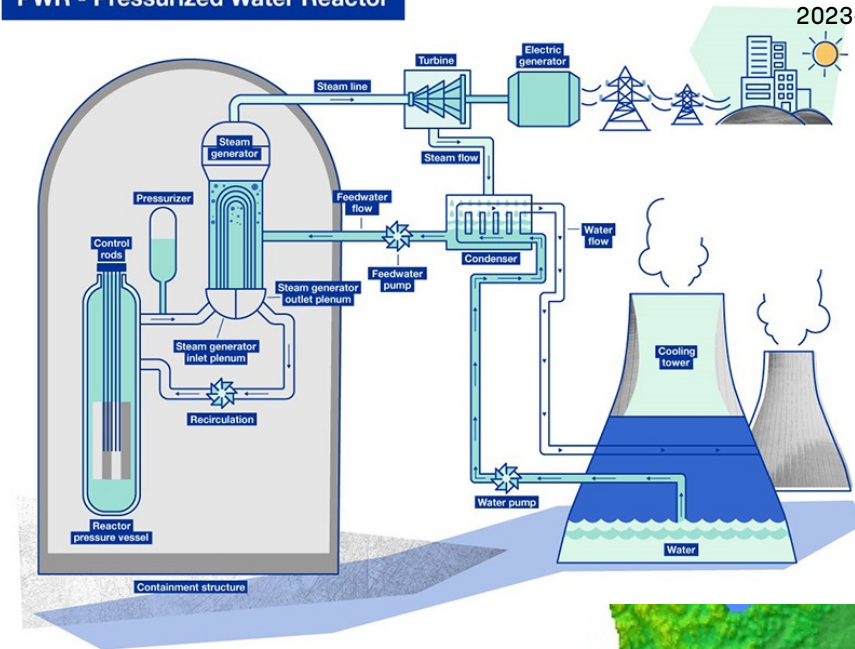
- Ånga
 - driver turbin
 - kyls i kondensor
- Värme i kylvatten utnyttjas inte
 - Stora kyltorn
 - Ut i havet
- Verkningsgrad
 - El typiskt 30%



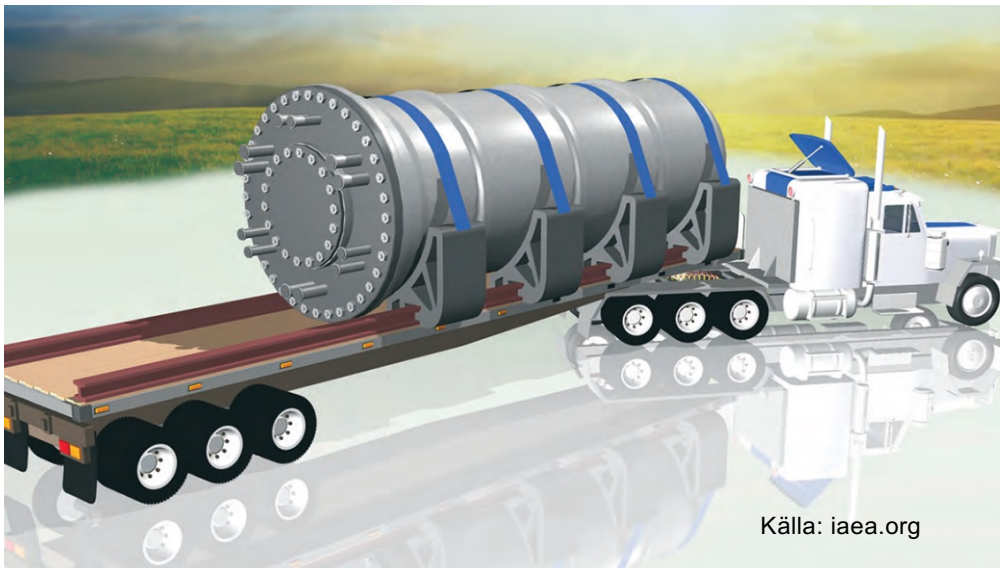
Källa: msnu.edu

Kärnkraftverk

- Kondenskraftverk
 - Koka vatten
 - Skicka genom turbin
 - Kyl ångan (kondenserar)
- Verkningsgrad $\approx 30\%$
 - Stort kylvattenbehov
 - Vid kusten i Sverige
 - Fjärrvärme tekniskt möjligt, men politiska beslut
- Avfall
 - Avfall från dagens verk upparbetas/lagras
 - Generation IV kan utnyttja detta som bränsle

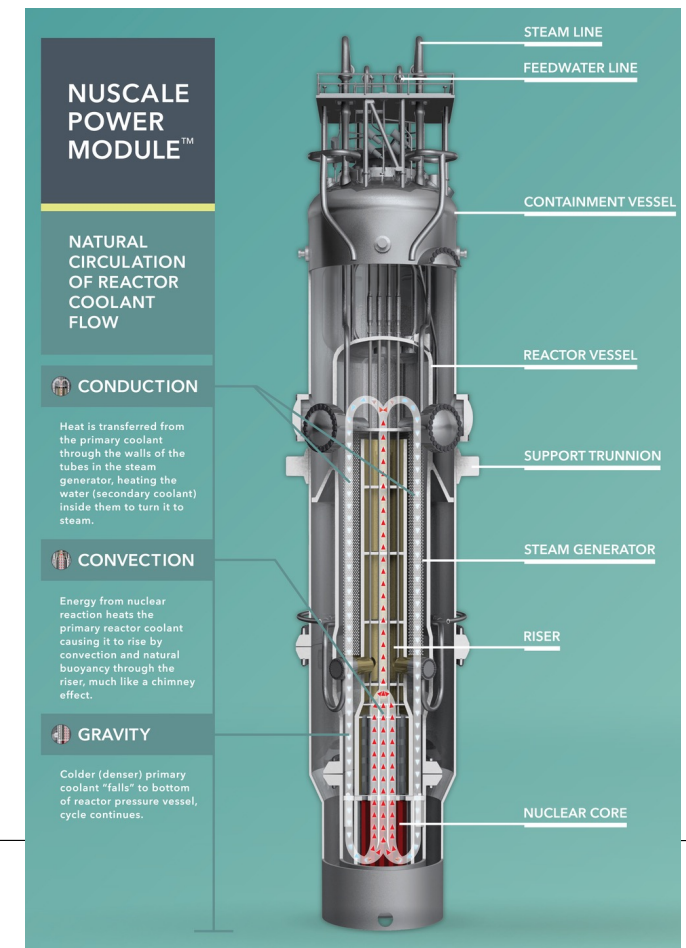
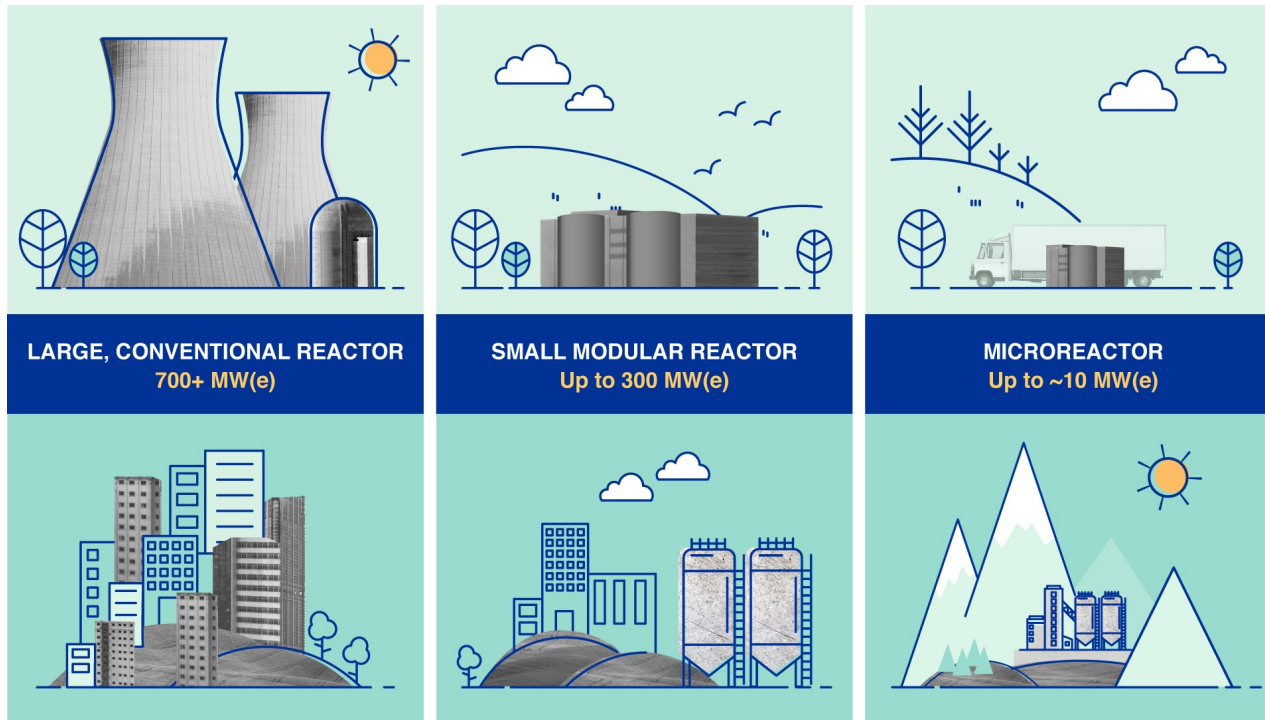


SMR - Små Modulära Reaktorer



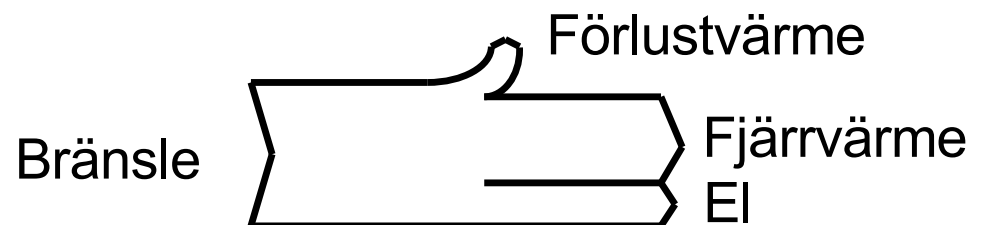
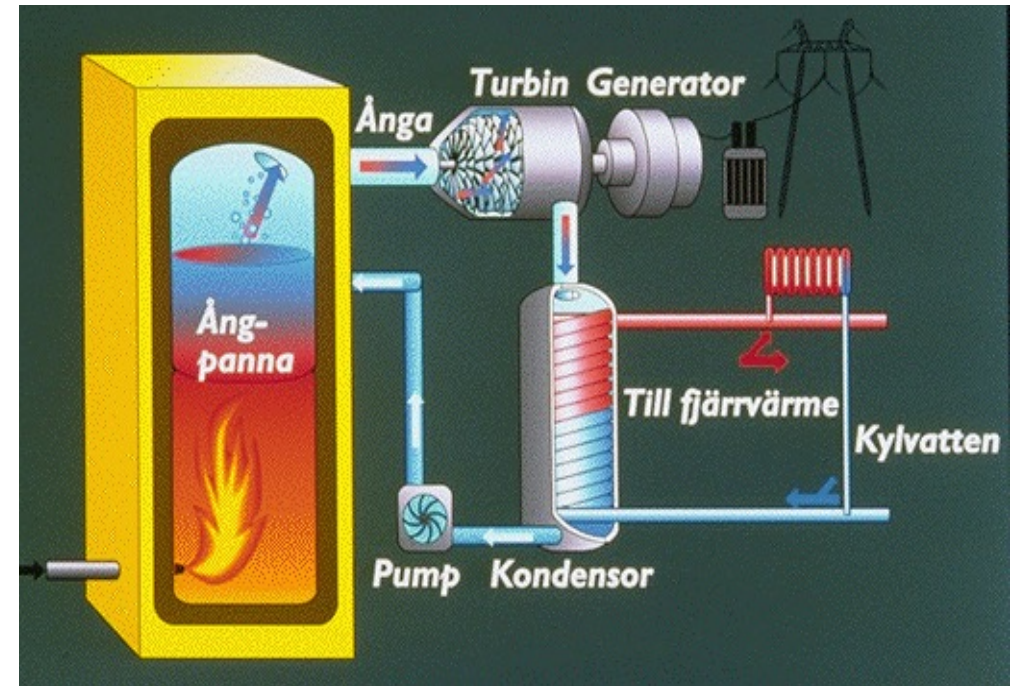
- Serietillverkning av små enheter
- Standardisering för internationella regler
- Passiv säkerhet
- Mindre bränslebehov med Generation IV
 - Dagens avfall blir användbart
- Med stöd av Energimyndigheten bygger Small Modular Reactors (Uniper, KTH, Blykalla) en blykyld reaktor utan nätanslutning i Oskarshamn

SMR - IAEA (International Atomic Energy Association)



Kraftvärmeverk

- Kondenskraftverk med fjärrvärmeverk
 - Combined Heat and Power - CHP
- Verkningsgrad
 - El 30% + värme 60%
 - Totalt 90 %
- Oftast bibränsleeldat i Sverige



Bioenergi

- Odlat material
 - Energiskog, halm, GROT, sågspill
 - Låg energitäthet
- Koldioxidneutralt
 - Växer och tar upp CO₂
 - Förbränns och avger CO₂
- Askåterföring
- Vanligast bränsle i svenska fjärrvärmeverk



Spån



Bark



Flis



Pellet

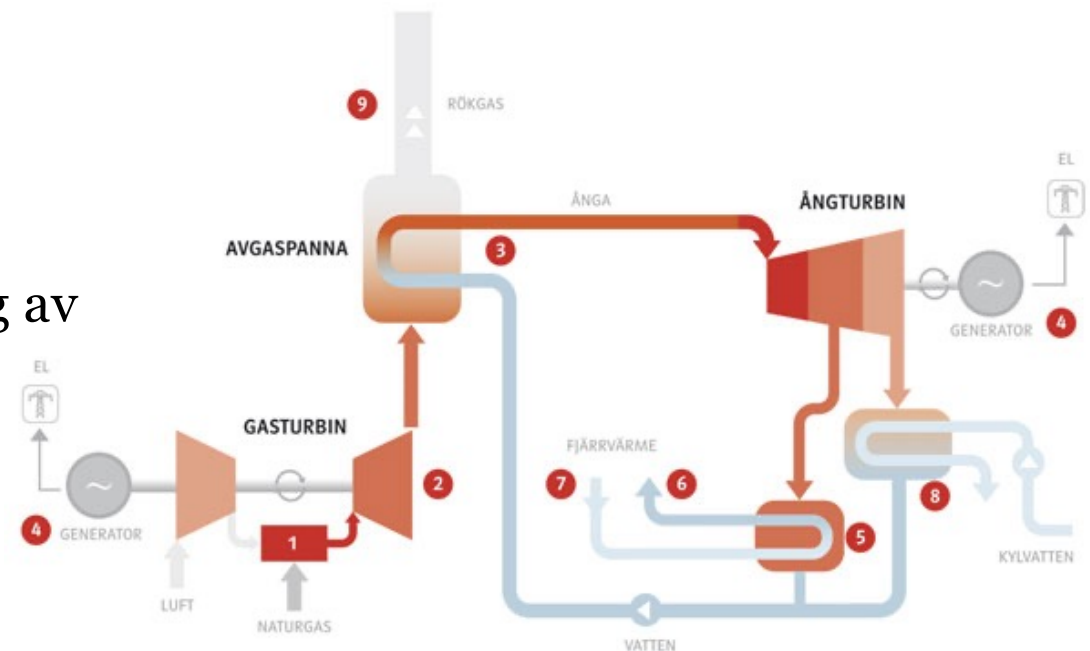
Dieselmotorkraftverk

- Reservkraft för nödlägen, i bergtrum
- Karlshamnsverket
oljeeldat topp- och reservkraftverk,
utgör produktionsdel i
effektreserven, som upphandlas av
Svenska kraftnät för vinterperioden
- Två block upp till 140 000 liter i
timmen, 562 MW
- 2021 (topp i sept): 28 000 ton olja



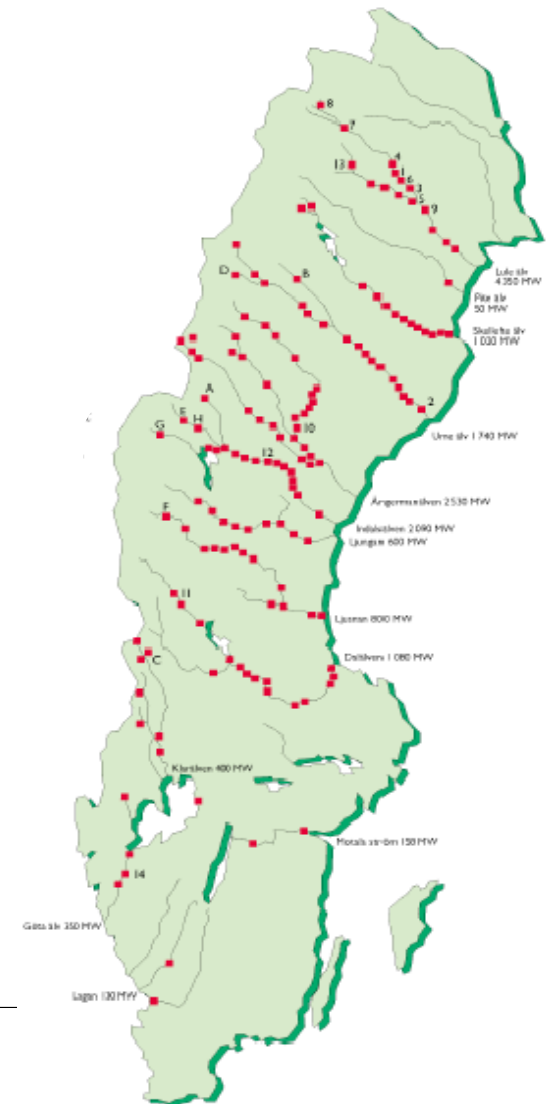
Öresundsverket invigt 2009, nedlagt 2017, återinföras 2025.

- Naturgaseldat gaskombikraftverk i Malmö
- 448 MW, 3TWh el, 250 MW, 1TWh värme, hög verkningsgrad
- Nedlagt, 2021 beslut om försäljning av komponenter, fjärrvärme kopplas bort
- Juni 2023, nytt beslut, ska ingå i Svenska elberedskapen, tillgänglig 2025.

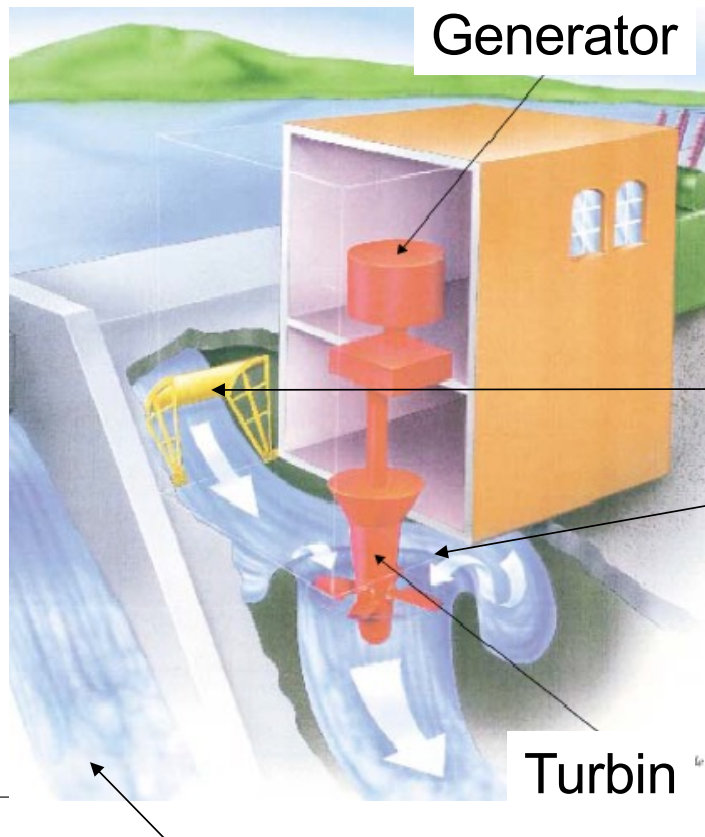


Vattenkraft i Sverige

- Norrlandsälvar utbyggda
 - Luleälven störst 4350 MW
 - Färdigutbyggt men effektivisering aktuell
- Basen i elförsörjningen
 - Dominerade före kärnkraften
 - Idag ca 40%
- Malmbanan elektrifierad 1915
 - Kraftverk byggda för tunnelarbetena
- Magasinen viktiga energilager - Vänern störst
 - Viktig reglerresurs när förnybart byggs ut



Vattenkraftverk



Potentiell energi \rightarrow kinetisk energi \rightarrow el

- Damm, magasin
- Flöde och fallhöjd
- Strömkraftverk saknar magasin

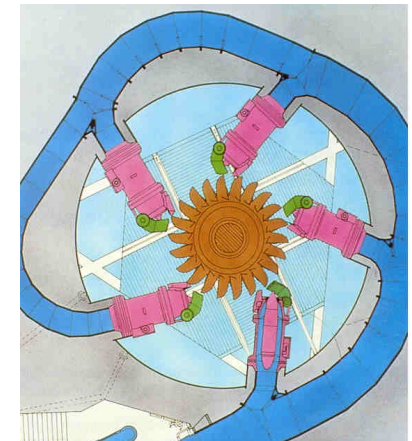
Elhydraulisk reglering

- På/av med dammluckor
- Justering med ledskenor
- Justera med skovelblad (Kaplan)

By-pass via "utskov"

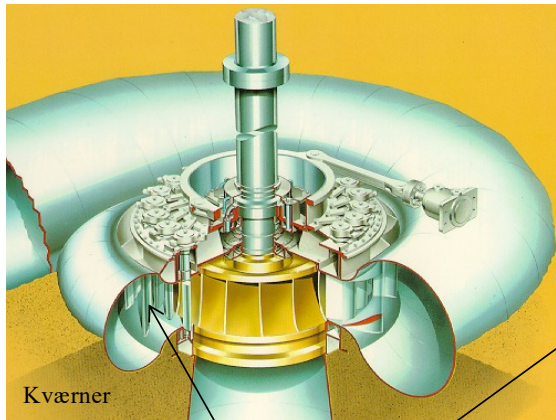
- Dammsäkerhet viktig
- Vattnet normalt dolt

Vattenturbiner



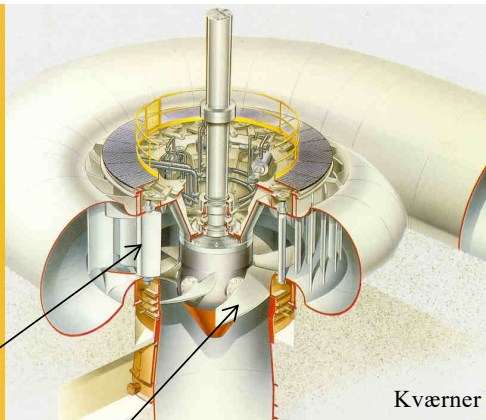
	Francis	Kaplan	Pelton
Fallhöjd	Medel	Låg	Hög
Flöde	Medel	Stort	Litet

Francis



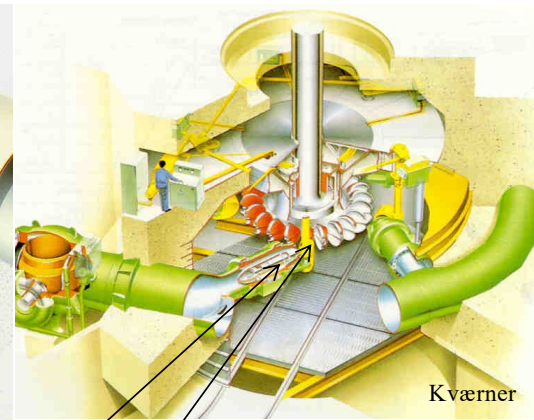
- Rörliga ledskenor
- Rörliga skovelblad

Kaplan



- Dysor
- Avlänkare

Pelton



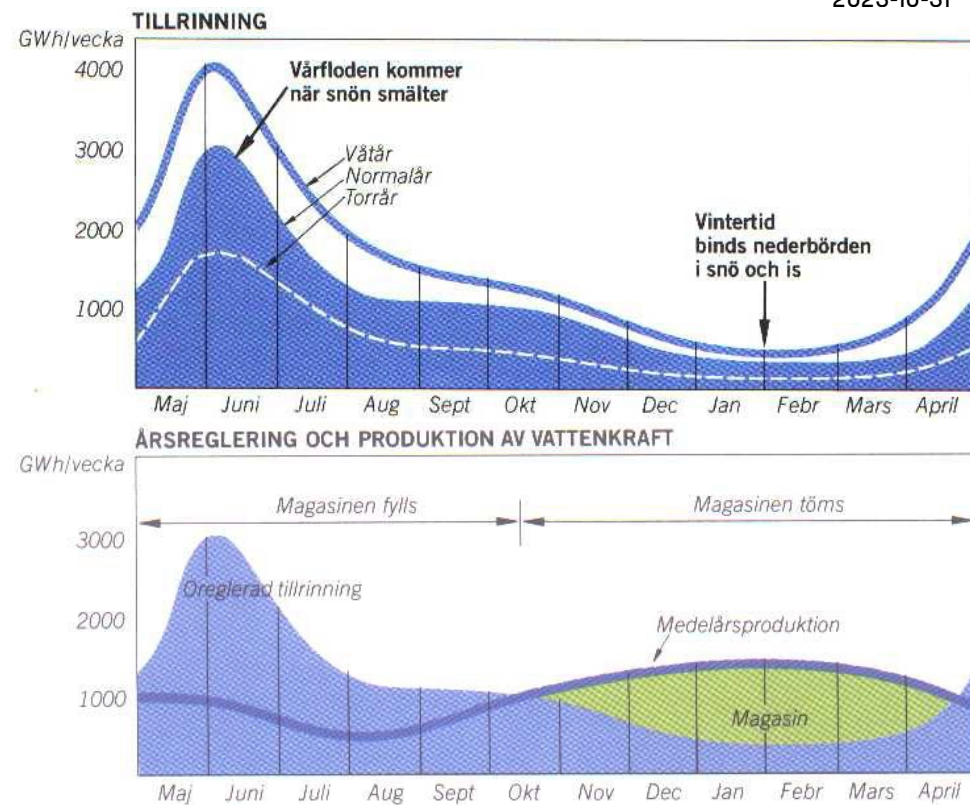
Norge: Jostedal, Sogn, Fjordane
 $Q = 28,5 \text{ m}^3/\text{s}$, $H = 1130 \text{ m}$, $P = 288 \text{ MW}$

Styr mekanisk effekttillförsel = aktiv effekt i generatorm

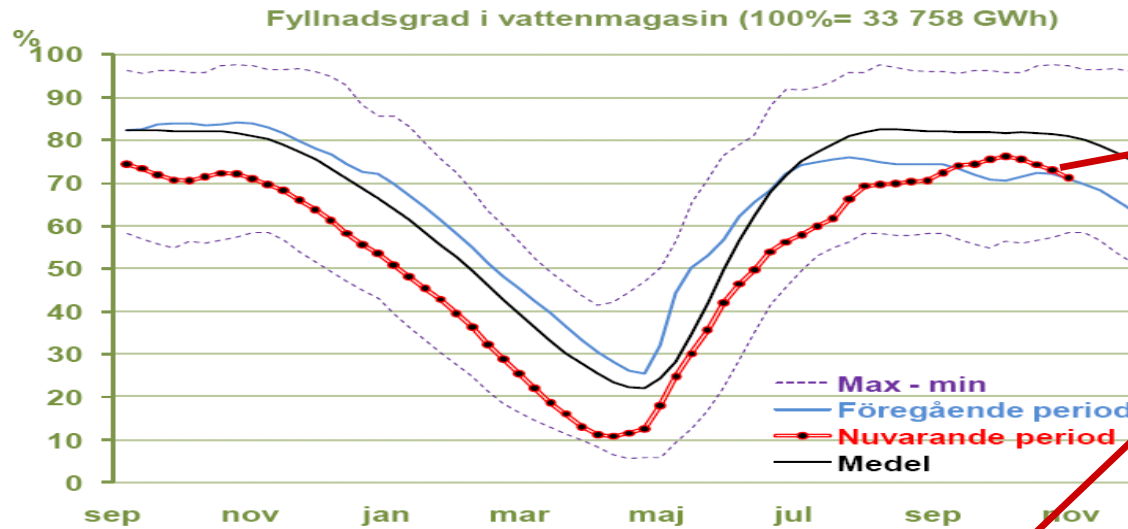
Vattenmagasin



- Magasinet är en buffert
 - Fylls vår och sommar när tillrinning > avtappning
 - Töms höst och vinter när avtappning > tillrinning

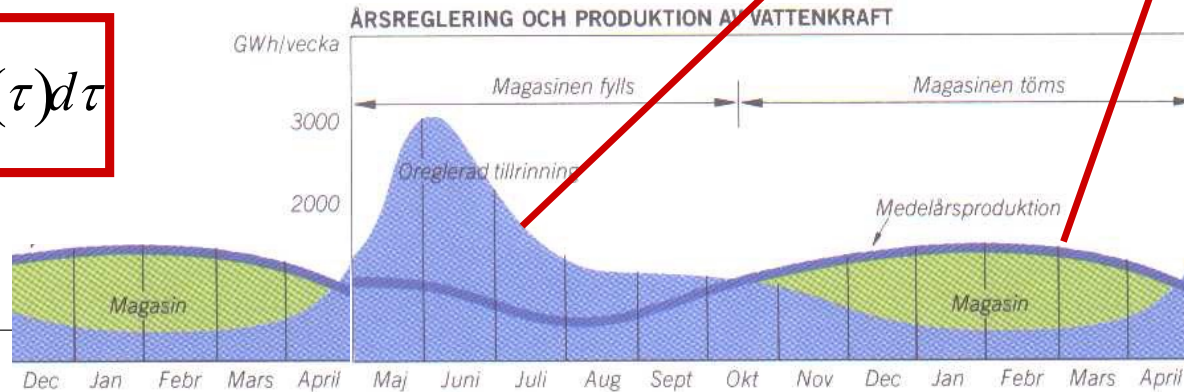


Balanskvation och integrallösning



$$\frac{dV}{dt} = q_{in} - q_{ut}$$

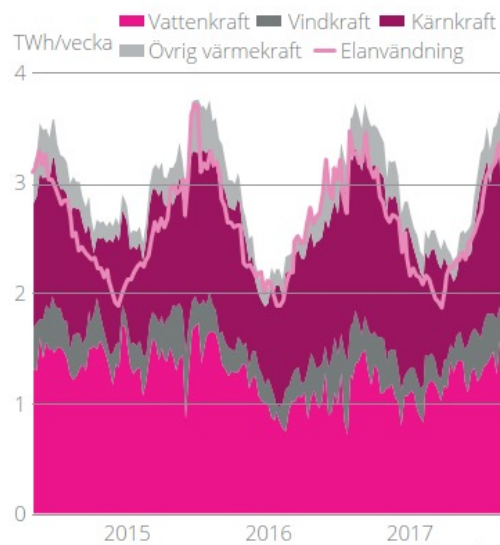
$$V(t) = V_0 + \int_0^t q_{in}(\tau) - q_{ut}(\tau) d\tau$$



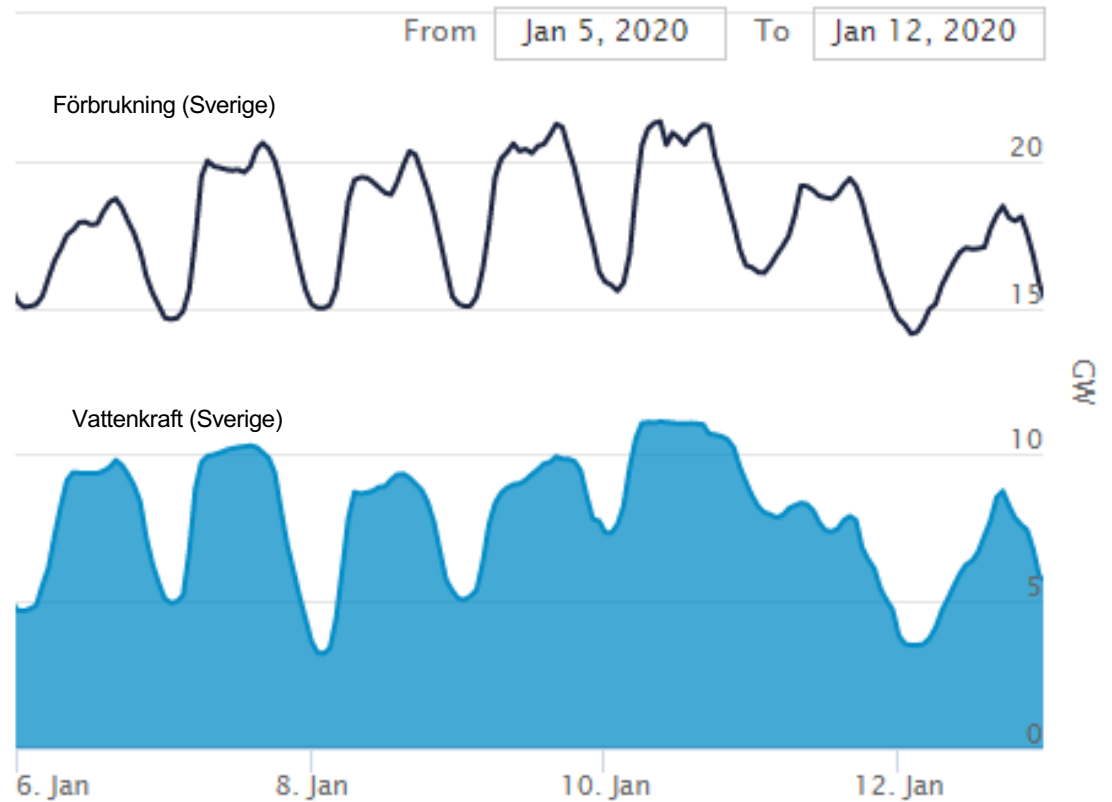
Vattenkraftreglering möter variationer

- Säsongreglering
- Dygnsreglering

ELPRODUKTION OCH ELANVÄNDNING I SVERIGE UNDER ÅREN 2015-2017, TWh/VECKA



Källa: Energiföretagen Sverige



Energiåret 2021 från Energiföretagen

TABELL 1. INSTALLERAD EFFEKT I LANDETS KRAFTSTATIONER, KRAFTSLAG, MW

	2020-12-31	2021-12-31
Vattenkraft	16 335	16 286
Vindkraft	10 017	12 074
Kärnkraft	6 871	6 882
Solkraft	1 090	1 593
Övrig värmekraft	6 887	6 591
- kraftvärme, industri	1 520	1 520
- kraftvärme, fjärrvärme	2 879	2 875
- kondens	905	662
- gasturbiner m.m.	1 583	1 534
Totalt	41 199	43 426

Källa: Energiföretagen Sverige, Energimyndigheten

TABELL 4. ENERGIBALANS, TWH NETTO, ENLIGT SCB MÅNADSSTATISTIK

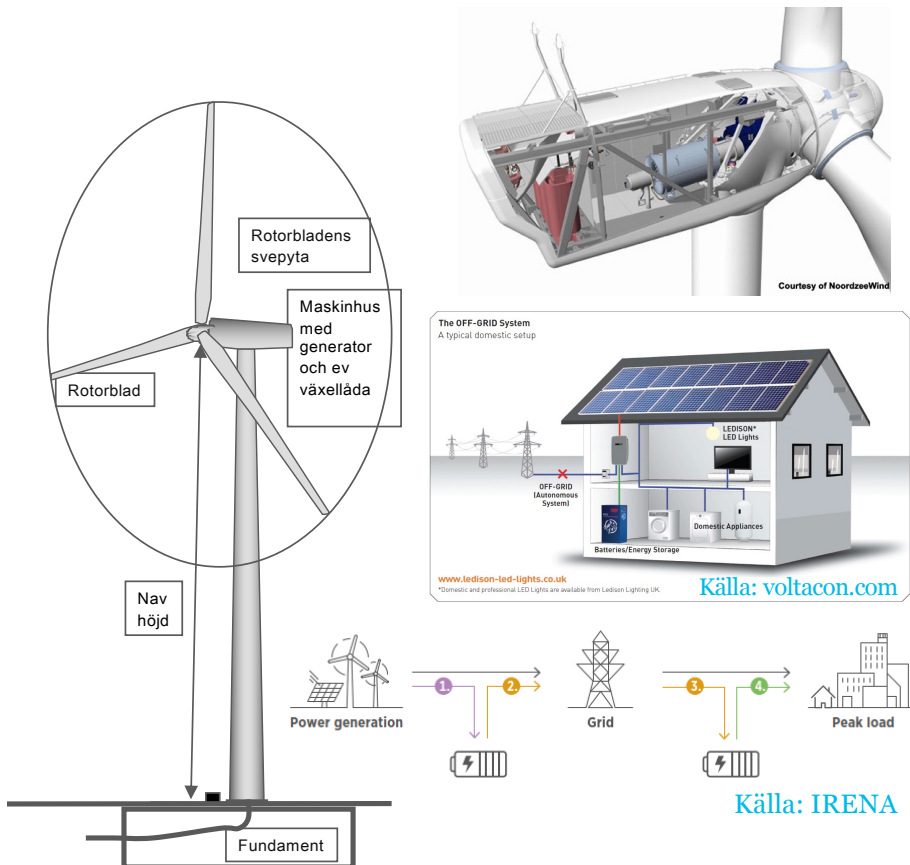
	2016	2017	2018	2019	2020	2021*
Produktion inom landet	152,5	160,5	159,7	165,6	161,0	165,8
Vattenkraft	61,7	64,7	61,8	64,9	71,9	70,6
Vindkraft	15,5	17,6	16,6	19,9	27,5	27,4
Kärnkraft	60,5	63,0	65,8	64,3	47,3	51,0
Solkraft	0,2	0,2	0,4	0,7	1,0	1,5
Övrig värmekraft	14,6	15,0	15,1	15,8	13,3	15,3
Kraftvärme, mottryck industri	5,9	5,3	5,9	6,8	5,8	6,5
Kraftvärme, mottryck fjärrvärme	8,1	8,7	8,1	8,2	6,5	7,5
Kondens	0,6	1,0	1,0	0,8	1,0	1,1
Gasturbin, diesel m m	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,20
Pumpkraft	-0,03	-0,04	-0,04	-0,06	-0,06	-0,05
Elanvändning inom landet	140,8	141,5	142,5	139,4	136,0	139,8
varav nätförluster	10,7	11,0	11,9	12,1	10,7	11,5
El från grannländerna**	14,3	11,9	12,2	9,1	11,8	8,3
El till grannländerna (-)**	-26,0	-30,9	-29,4	-35,2	-36,8	-33,9
Netto utbyte med grannländer ***	-11,7	-19,0	-17,2	-26,2	-25,0	-25,6

* Preliminär uppgift Energiföretagen, **Enligt gamla systemet, *** Negativa värden är lika med nettoexport

Kraftslagen används på olika sätt

- **Kärnkraft:** Full effekt utom vid underhåll
- **Vindkraft:** ”Variabel” - vinden avgör, maxeffekt nås sällan
- **Solel:** ”Variabel” - sol+moln avgör, maxeffekt vid molnfritt
- **Kraftvärme:** Värmebehovet (=utetemperaturen) styr
- **Vattenkraft:** Snabbt styrbar – balanserar vind-/solel, Vattenmänden begränsad – hushålla!
- **Dieselekraft:** Reservaggregat för nödvändiga samhällsfunktioner
- **Gasturbiner:** När allt annat inte räcker

Andra kraftkällor – senare



Vindkraft

Solkraft, solceller (Photo Voltaic, PV)

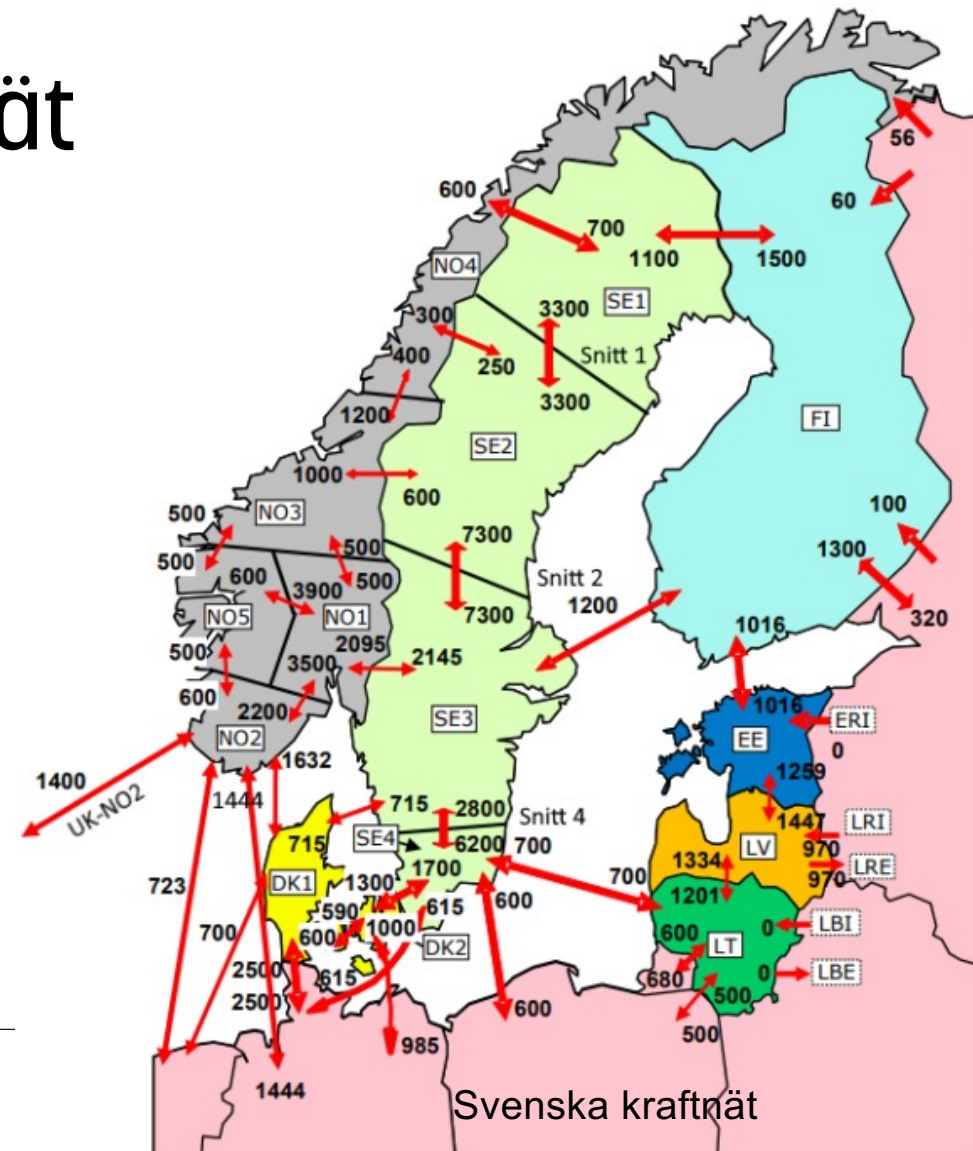
Vågkraft (vågor, tidvatten)

Bränsleceller, vätgas

“Energilager”

Sammankoppling av elnät

- Elenergikällor olika
 - Säsong, brist, överskott
 - Kompletterar varandra
- Nät kopplas samman
 - Regioner
 - Länder
 - Skåne till DK 1915, norrut 1937
- Större elmarknad



Sammanfattning

- *Värmekraftverk* levererar el
- *Kraftvärmeverk* levererar el och fjärrvärme
- Viktiga *kondenskraftverk* i Sverige är kärnkraftverken
- I ett vattenkraftverk bestäms pådraget av ledskenor och ev. skovelbladsvinkel
- *Fulleffekttimmar* för svensk sol-, vind-, vatten-, kärnkraft? 1000, 2-3000, 4000, 7000 h

2. Synkronmaskinen som generator

Synkronmaskinen



Forsmark 2 kärnkraftverk
En av 2x580 MW generatorer
Rotor: 2 poler, 3000 rpm



Harsprånget G5 vattenkraftverk
475 MW generator
Rotor: 56 poler, 107 rpm, \varnothing 14 m
Turbinrotor: \varnothing 6,6 m



Enercon vindkraftverk
Stator 2,3 MW generator
Rotor: 60 poler, 6-22 rpm
Turbinrotor: \varnothing 82 m

Magnetiska kretsar

- Magnetiskt flöde [Wb] $\phi_c = B_c A_c = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{a}$
 B – flödesdensitet [T]
 A – tvärsnittsarea

- Magnetomotorisk kraft (mmf)

$$\mathcal{F} = N i = H l = \oint \mathbf{H} d\mathbf{l}$$

H – Magnetisk flödesintensitet

$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ (linjärt antagande)

$\mu = \mu_0 \mu_r$ – magnetisk permeabilitet

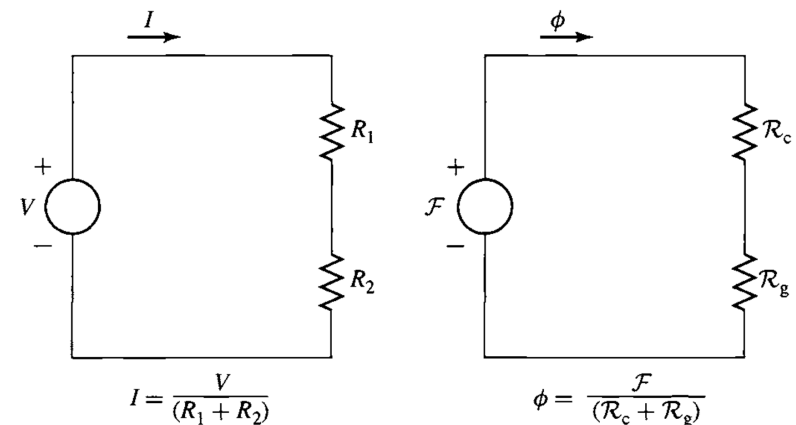
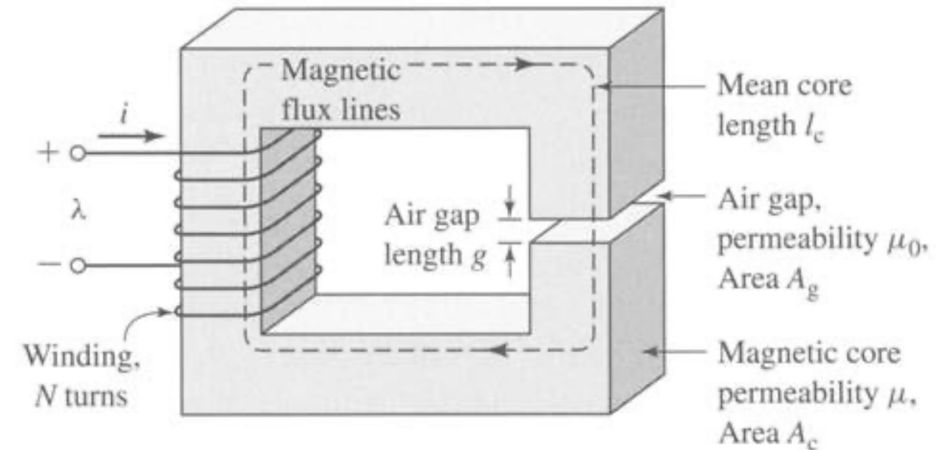
$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \left[\frac{H}{m} \right], \quad \mu_r = 2000 - 80000$$

- Kretsen i exemplet

$$\mathcal{F} = N i = \phi \left(\frac{l_c}{\mu A_c} + \frac{g}{\mu_0 A_g} \right) = \phi (\mathcal{R}_c + \mathcal{R}_g)$$

- Luftgapet dominerar den magnetiska reluktansen

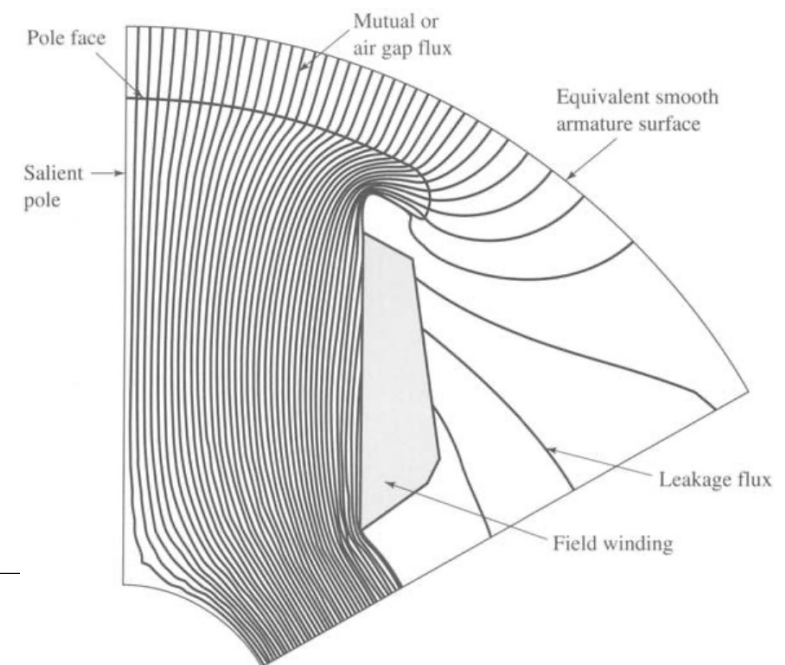
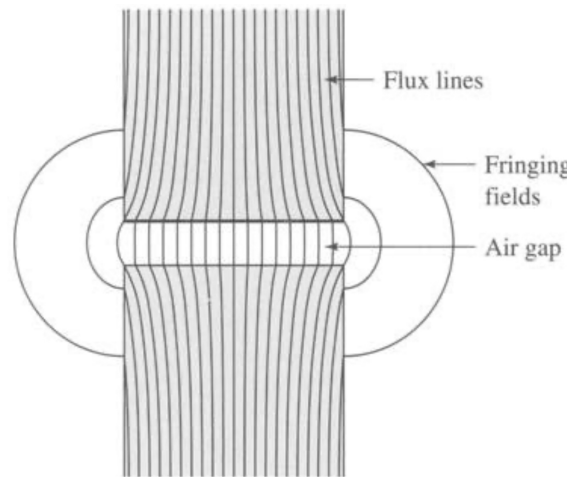
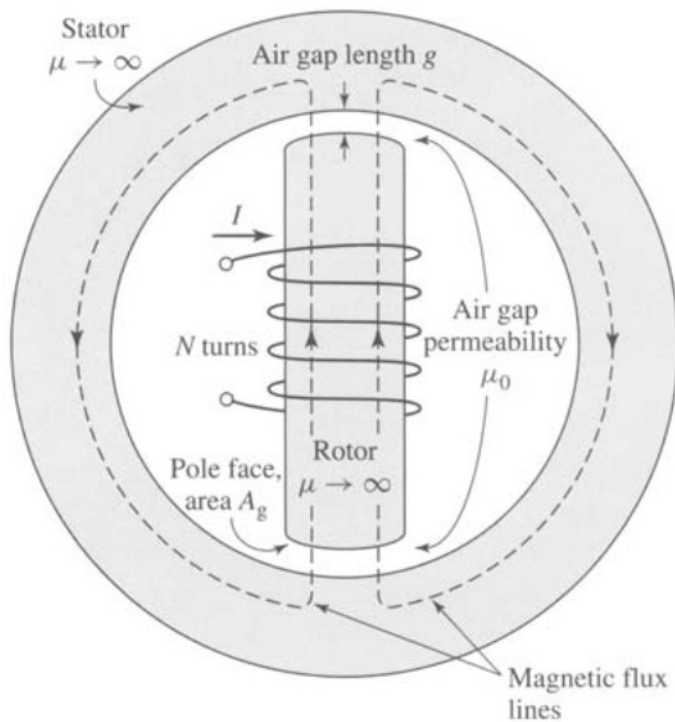
$$\mathcal{R}_c \ll \mathcal{R}_g$$



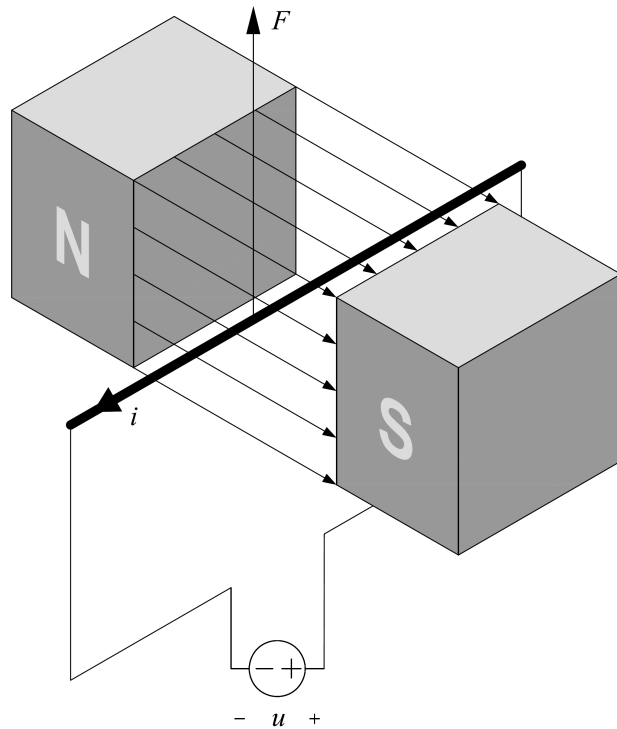
Magnetiska flödet styrs av luftgapet

Räkneuppgift på lektionen

- Vissa flöden går utanför kärnan, läckage
- Leakage fields – Flux leakage



Strömförande ledare i magnetfält - kraft



Flödesväg från S till N finns men visas ej.

- Strömmen i i ledaren med längd l kan betraktas som laddningar i rörelse, vilket ger upphov till en kraft:

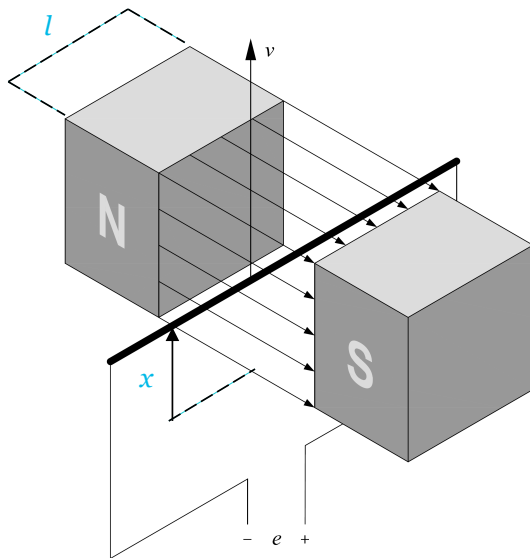
$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad \text{HögerHandsRegeln: F-v-B}$$

- Rörelsen vinkelrät mot fältet:

$$F = qvB = q \frac{l}{t} B = \frac{q}{t} lB = ilB$$

När en ledare med längd l i ett magnetfält B leder strömmen i påverkas ledaren av en kraft $F=ilB$, HHR: F-i-B

Induktion – Rörlig ledare i magnetfält även ledare i rörligt magnetfält



Flödesväg från S till N finns men visas ej.

OBS! e sitter i ledaren som rör sig. $e > 0 \rightarrow$ ström medsols i slingan \rightarrow flöde motriktat B

- Induktionslagen säger:
- Genom ledarslingan går flödet Φ :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$\Phi = BA = Bxl$$

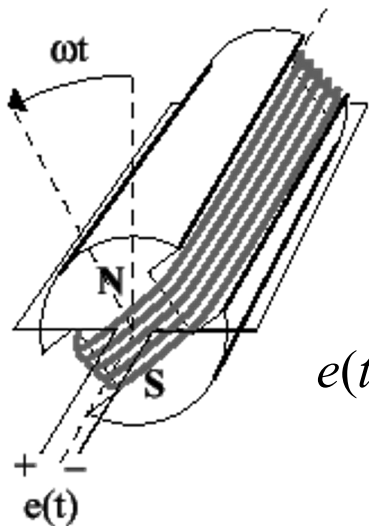
- När ledaren/slingan rör sig induceras:

$$|e| = \frac{d\Phi}{dt} = B \frac{dx}{dt} l = Bvl \quad \frac{d\Phi}{dt}$$

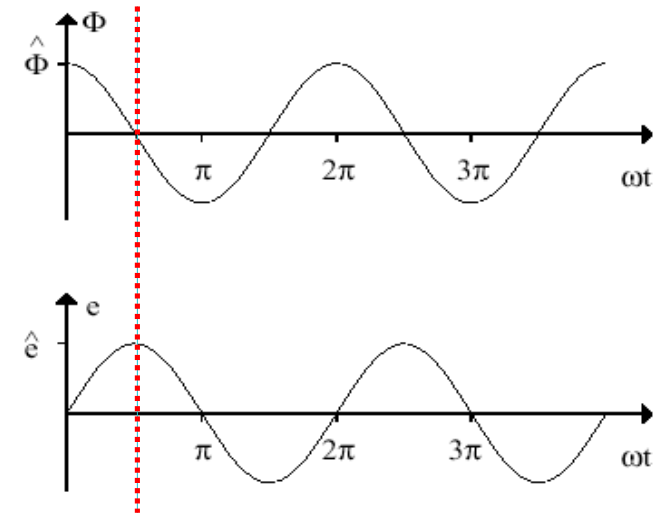
- Tecken på e så ström motverkar
- Tecken i bilden stämmer!

När en ledare med längd l rör sig vinkelrätt mot ett magnetfält B med hastighet v induceras en elektromotorisk kraft $e=Bvl$, HHR $e-v-B$

Rotation inducerar spänning i ankar (stator) lindningen



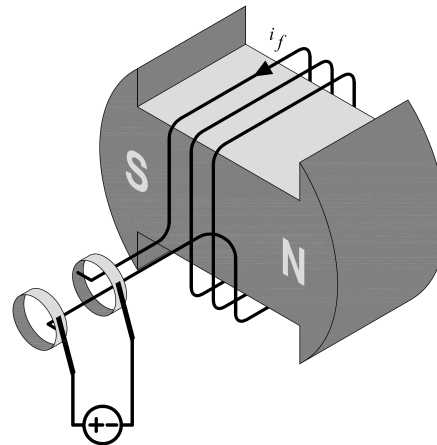
$$e(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(BA\cos\omega t)}{dt} = BA\omega\sin\omega t$$



- Rotation → sinusformad (här cosinus) flödes variation
- $e(t)$ is ElectroMotorisk Kraft (EMK / EMF), motsvarande spänning
- $e(t)$ når maximum när rotorpolen passerar lindningen

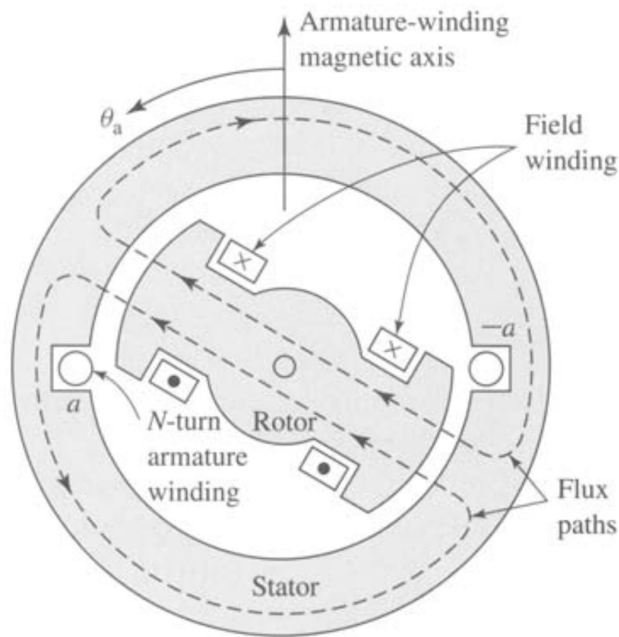
Elektrisk magnetisering

- Med en elektromagnet i rotorn kan spänningen regleras
 - Används i alla vattenkraft- och kärnkraftverks stora generatorer

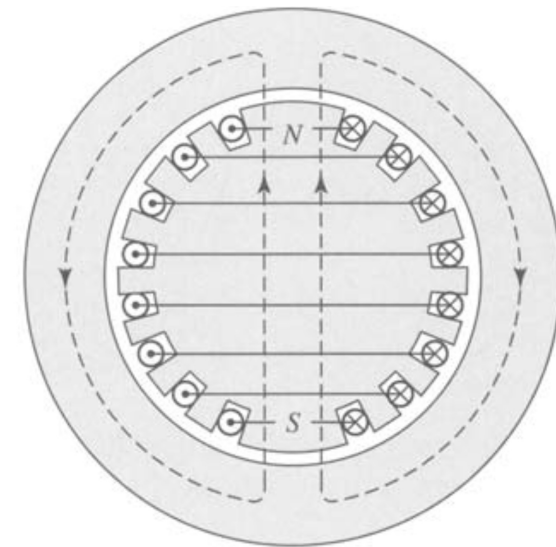
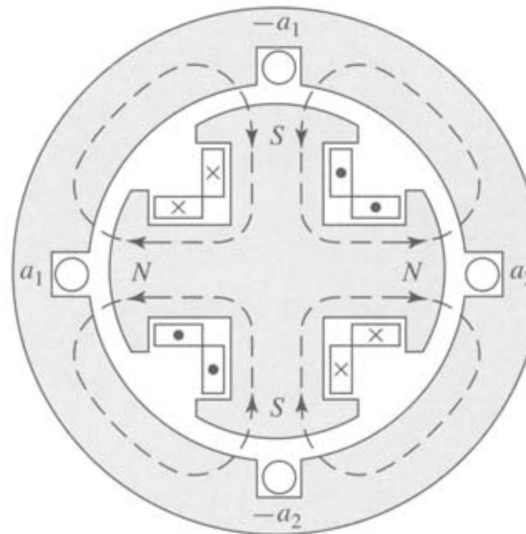


- En likström i_f leds via släppringar till rotorn. Alternativt används roterande transformator och likriktare.
- B i ekvationerna ersätts med $k \cdot i_f$ där k är en konstant.

Två- och fyr-poliga enfas AC maskiner



Salient pole, uttalade poler



Non-salient pole, cylindrisk rotor

Fyrpolig enfas AC maskin

- Flerpolig maskin **olika** vinklar i **mekanisk** θ_a och **elektrisk** θ_{ae} domän.
- $\theta_{ae} = \left(\frac{\text{poles}}{2}\right) \theta_a$, varvtal N (rpm) och elektrisk frekvens $f_e = \left(\frac{\text{poles}}{2}\right) \frac{N}{60}$ Hz

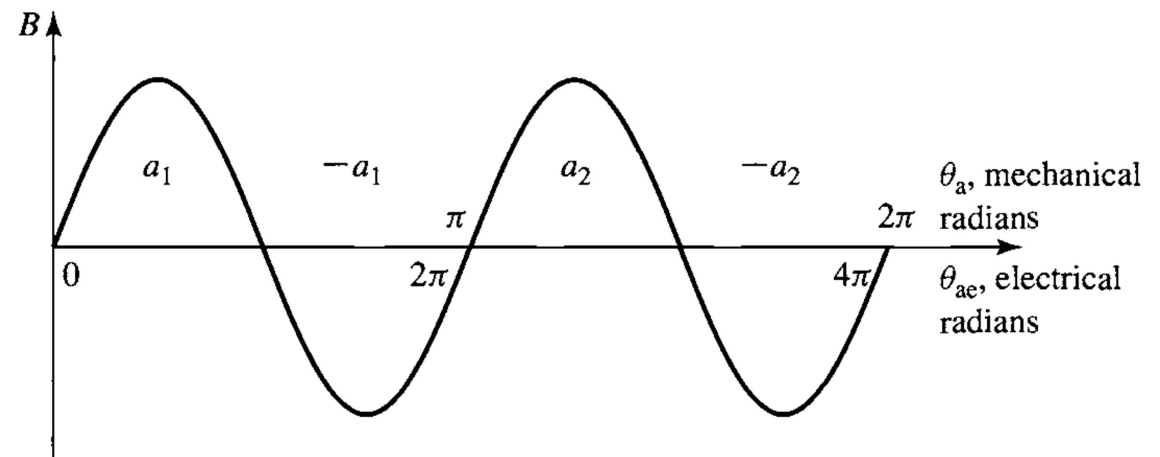
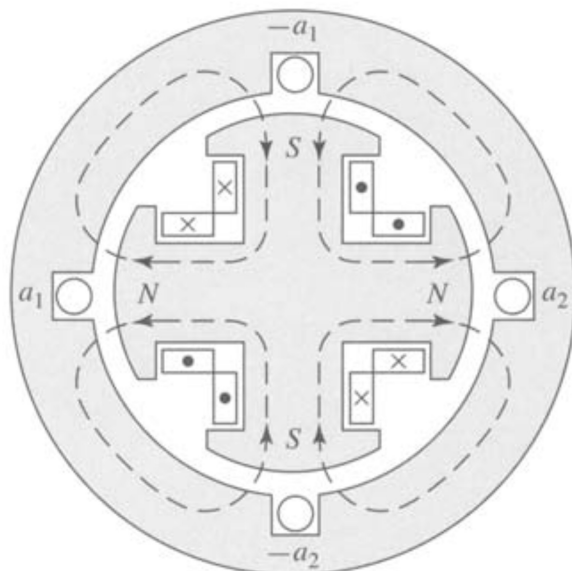
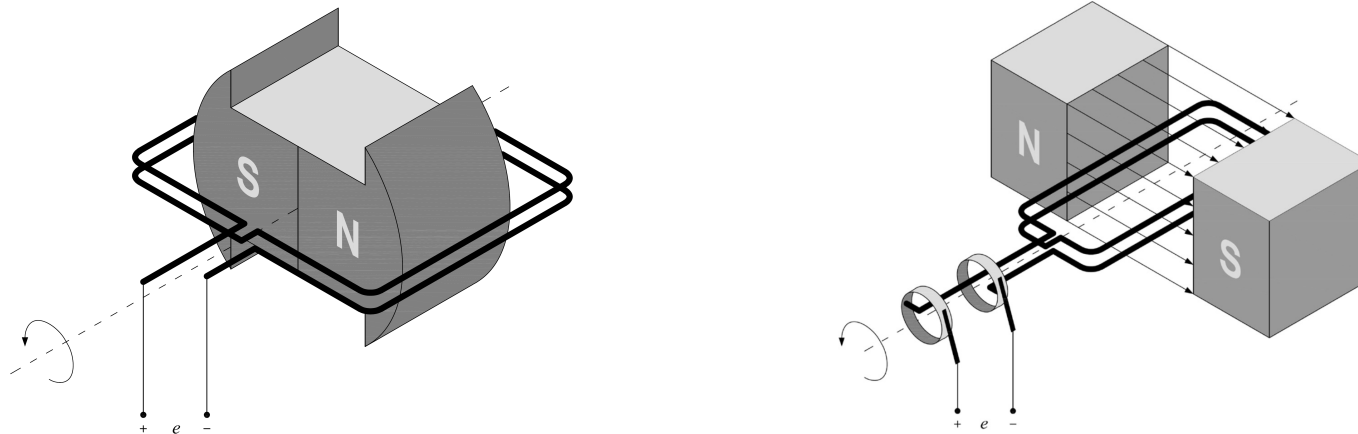


Figure 4.7 Space distribution of the air-gap flux density in a idealized, four-pole synchronous generator.

Stillastående lindning

- I praktiken är lindningen still och magneten som skapar fältet roterar



- Fysik och ekvationer bygger på fältets rörelse relativt lindningen
 - Ut-och-in-vändningen påverkar varken fysik eller ekvationer
- Definition: Lindning där emk induceras = eng. *armature winding*, sv. *ankarlindning* och anges med index a

Trefas maskiner 2-, 4-pol

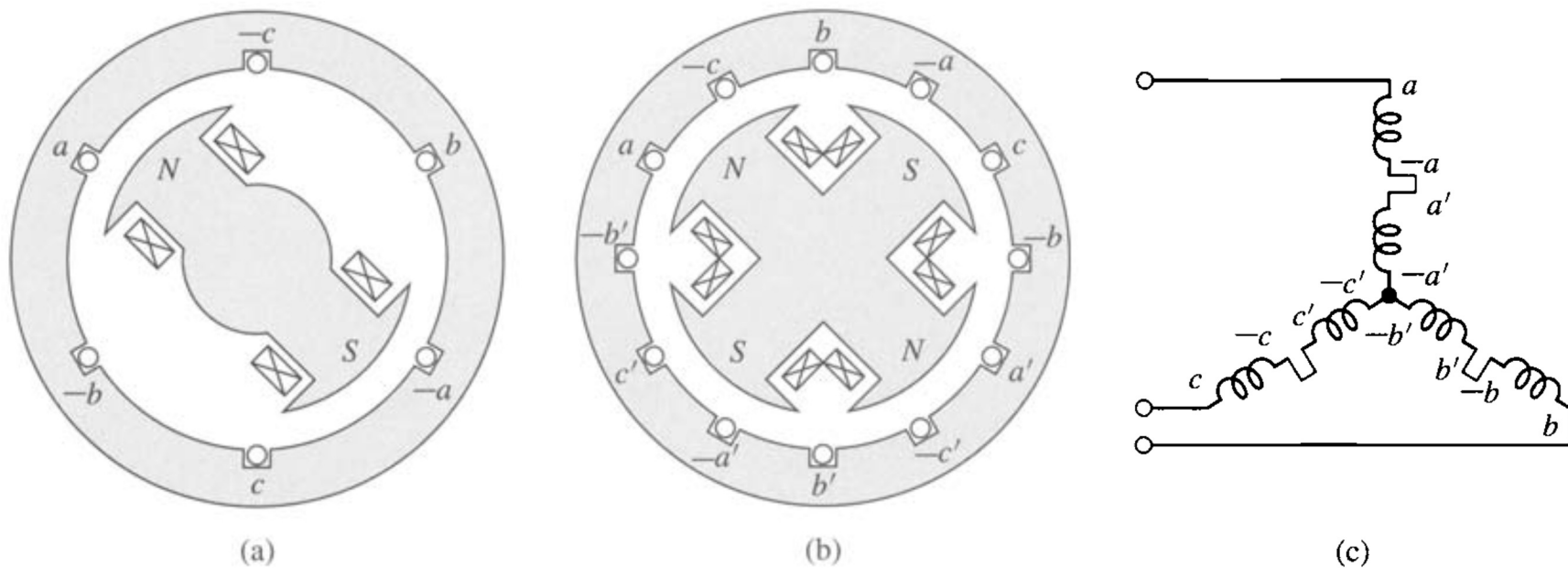
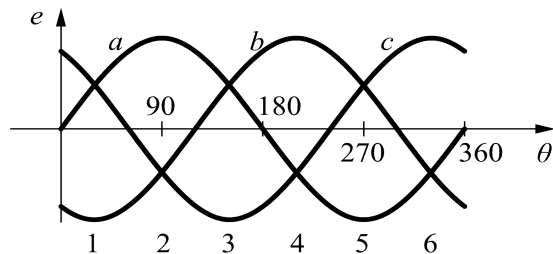


Figure 4.12 Schematic views of three-phase generators: (a) two-pole, (b) four-pole, and (c) Y connection of the windings.

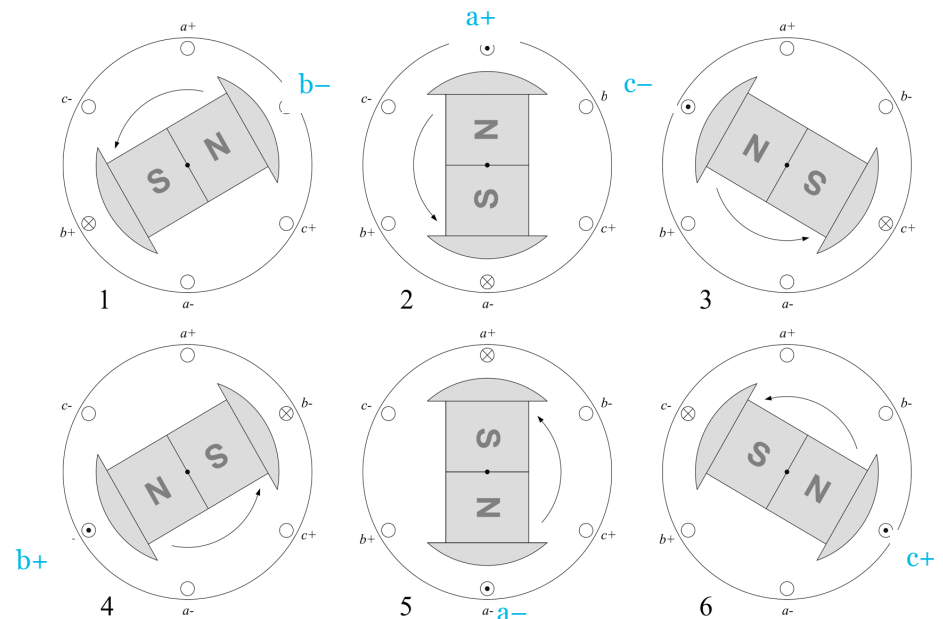
Trefasig synkronmaskin - spänningar

- Tre lindningar riktade 0, 120, 240°
- Tre sinusspänningar fasförskjutna 0, -120, -240°

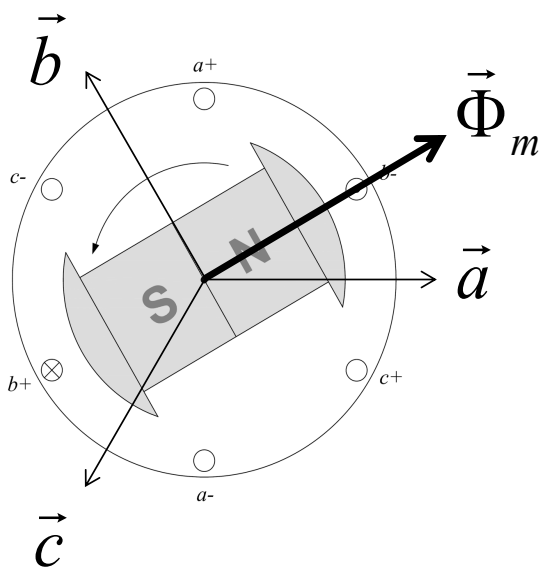


- Sex gånger per varv induceras max $|e|$

Detta är ett trefasigt spänningssystem!
Grunden för elkraftsystem i världen.



Vektorer

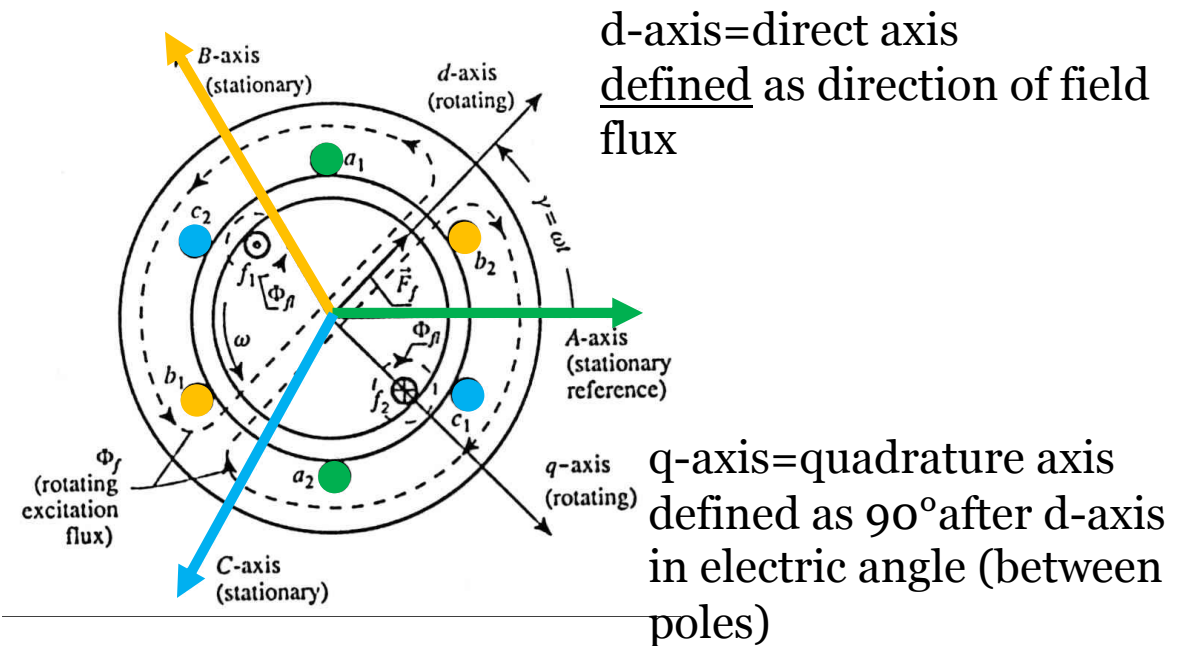


- Associera en vektor $\vec{\Phi}_m$ till rotorflödet
- Definiera varje lindnings riktning \vec{a} \vec{b} \vec{c}
= Dess magnetflödes riktning @ $i > 0$
- En lindnings inducerade e en vektor
 - Exempelvis $\vec{e}_a(t) = e_a(t)\vec{a}$
- Summera till en total e-vektor

$$\vec{E}_m(t) = \vec{e}_a(t) + \vec{e}_b(t) + \vec{e}_c(t)$$

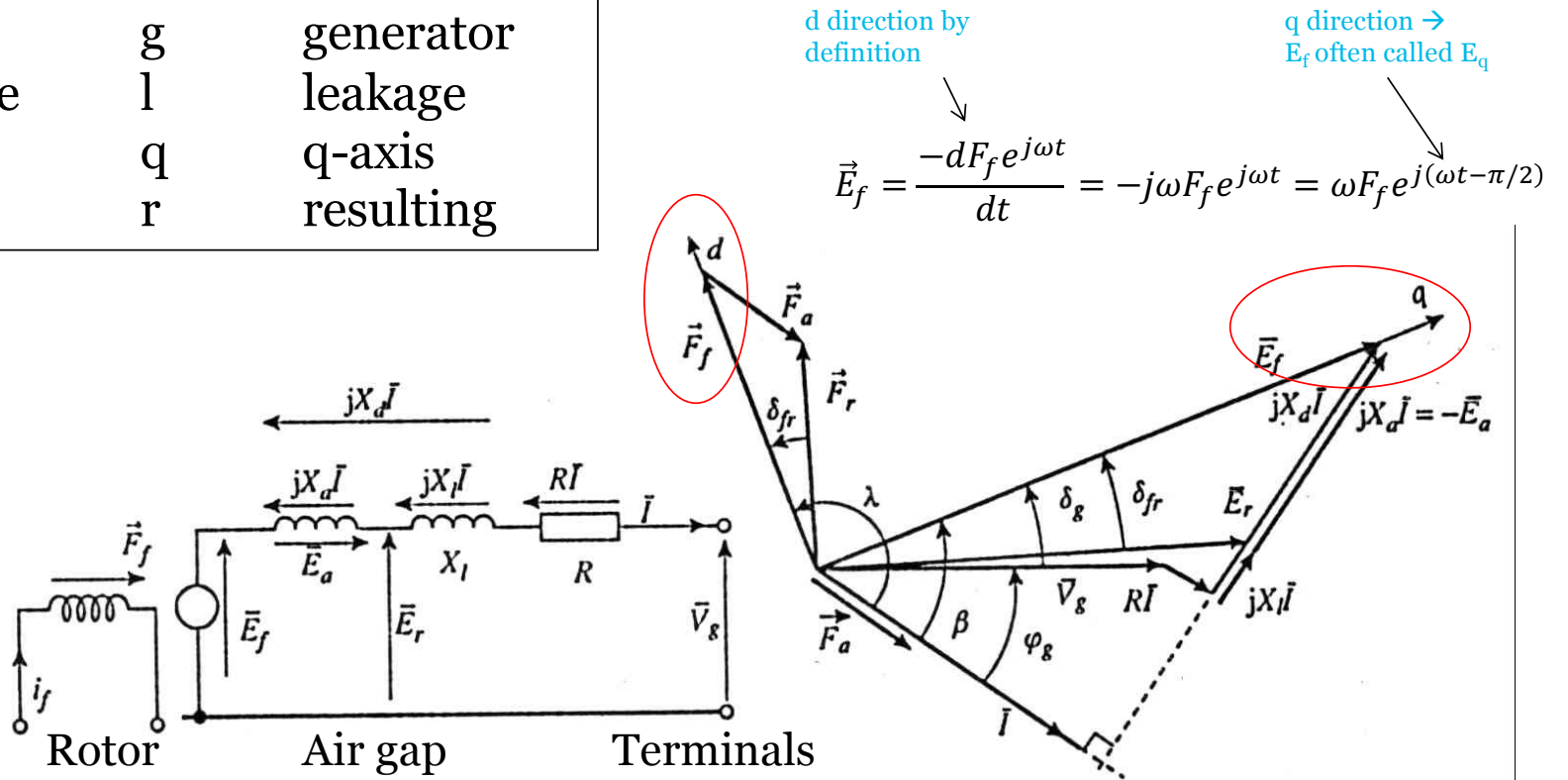
Synkronmaskin - tomgång

- Rotor
 - En fältlindning f_1-f_2 matas med DC
- Stator
 - Tre lindningar $a_1-a_2, b_1-b_2, c_1-c_2$ 120° separation i geometrin
- d-riktning och q-riktning används eftersom det förenklar regleringen.
- Tar bort komplicerade tidsvarierande fältekvationer
- Transformationer: Clarke and Park
- Mer i kursen elektriska drivsystem.

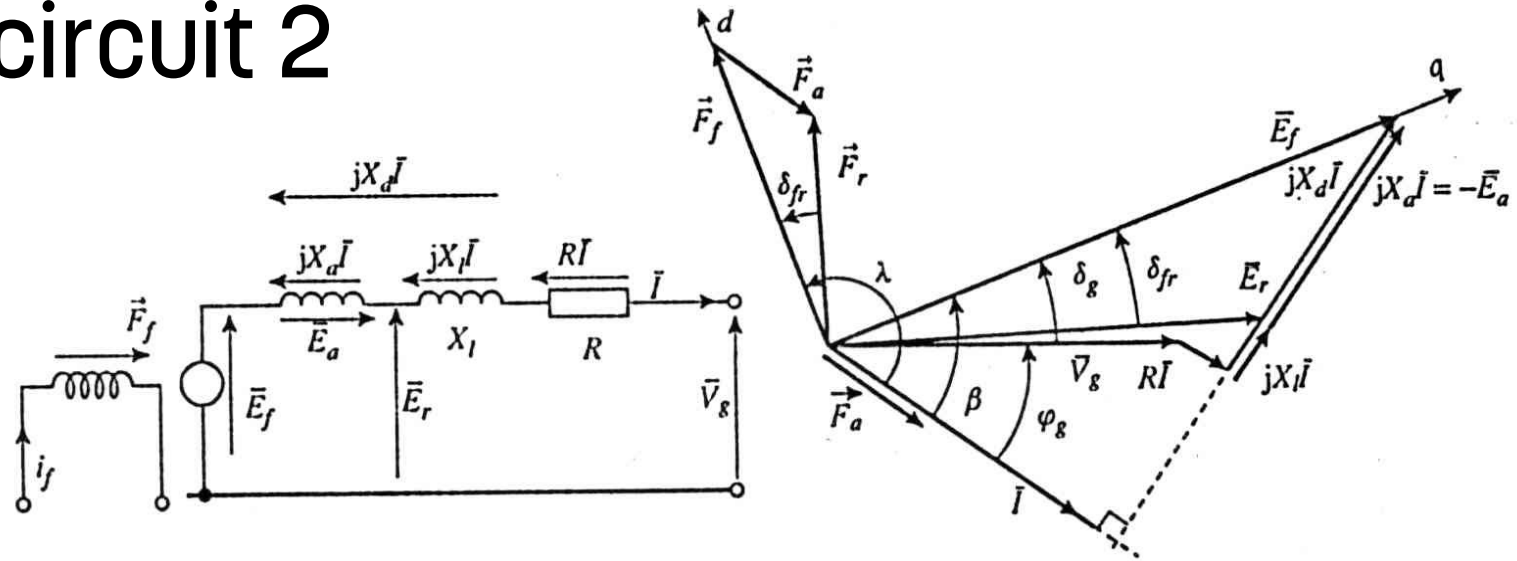
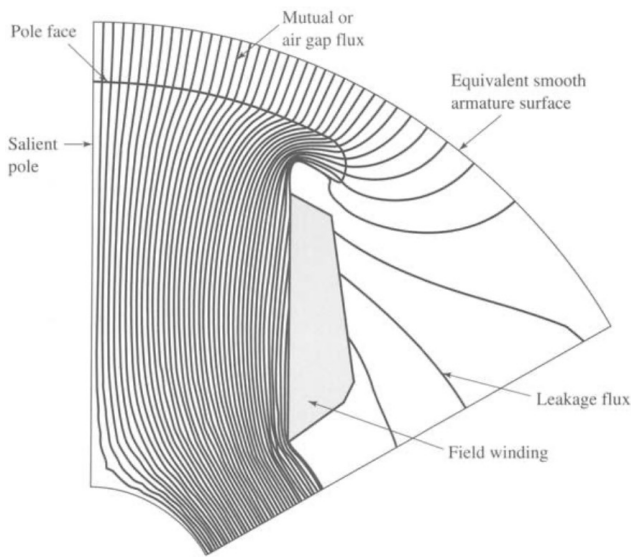


Equivalent circuit 1

Indices:	g	generator	
a	armature	l	leakage
d	d-axis	q	q-axis
f	field	r	resulting



Equivalent circuit 2



$$E_f(I_f)$$

$$I$$

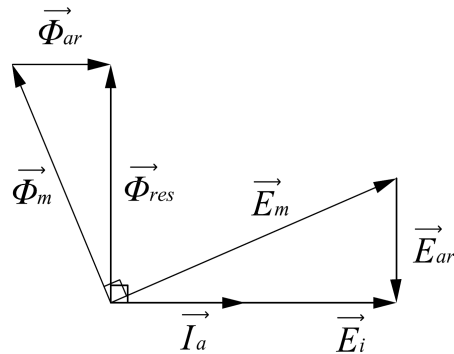
$$V$$

$$X_d = X_a + X_l \approx X_a$$

$$E_f = V + (R_a + jX_d)I$$

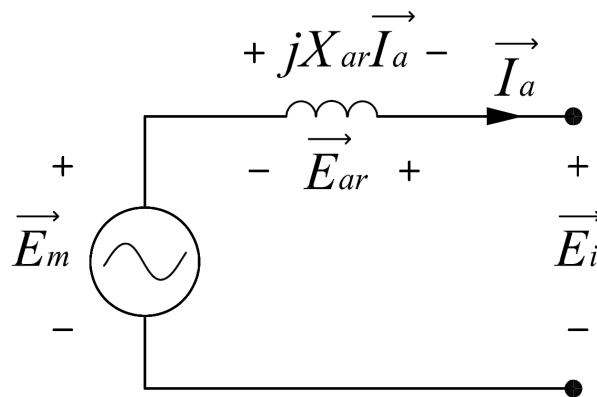
internal voltage (also E_g)
 stator current
 terminal voltage
 I lags V by angle ϕ_g
 E_f leads V by angle δ_g

Synkrongenerator – förenklat ekvivalent schema



- Belastning → Ström \vec{I}_a i lindningen
- Strömmen ger ett eget roterande flöde $\vec{\Phi}_{ar}$ i fas med \vec{I}_a . Detta kallas *ankarreaktion*.

$$\vec{\Phi}_m + \vec{\Phi}_{ar} = \vec{\Phi}_{res} \quad \text{inducerar} \quad \vec{E}_m + \vec{E}_{ar} = \vec{E}_i$$



- Ankarreaktionen ser ut som ett spenningsfall över en reaktans
$$-\vec{E}_{ar} = jX_{ar}\vec{I}_a$$

Synkrongeneratorns ekvivalenta schema för en fas har inducerad emk \vec{E}_m och reaktans X_{ar}

Rotorns moment, T

Fysik

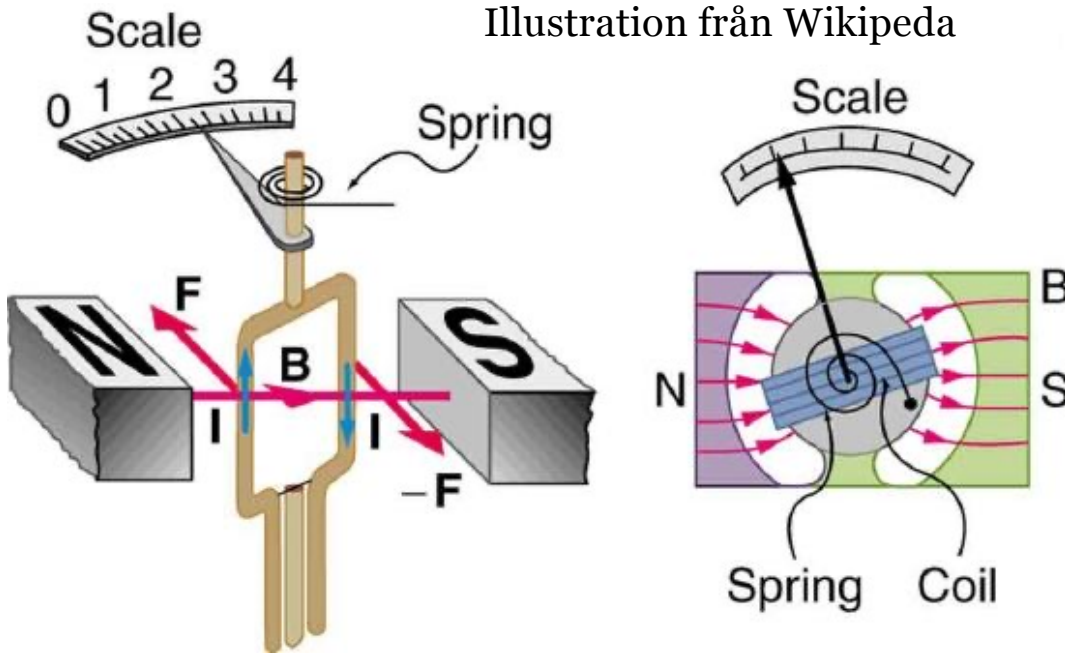
- $T = N I A B \sin \theta$
 - N - varv i lindningen
 - I - ström
 - A - omsluten area
 - B - magnetisk fältstyrka
 - θ - vinkel mellan magnetfälten

Elmaskinsnomenklatur

$$T = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\text{poles}}{2} \right)^2 \Phi_R F_f \sin \delta_{RF}$$

- Φ_R resultant air-gap flux per pole
- F_f mmf of the dc field winding
- δ_{RF} electrical phase angle between magnetic axes of Φ_R and F_f

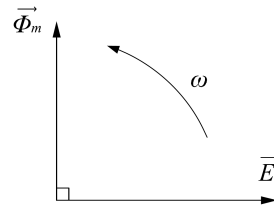
Illustration från Wikipedia



Två magnetfält och $\sin \delta_{RF}$

Synkrongenerator i tomgång

- Låt \vec{E}_i beteckna spänningen vid generatorns anslutningar
- Vid tomgång är $\vec{E}_i = \vec{E}_m$ (m=magnetiserande)
- Vektordiagram

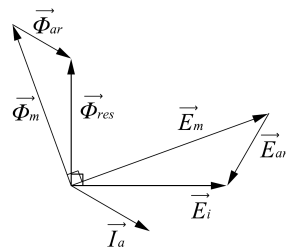
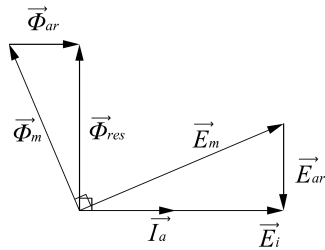
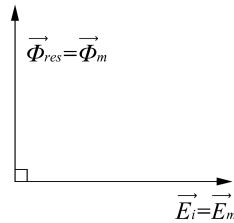


- Induktionslagen på vektorform!

$$\vec{E}_m = -\frac{d\vec{\Phi}_m}{dt} = -\frac{d}{dt}(\Phi_m e^{j\omega t}) = -j\omega\Phi_m e^{j\omega t} = -j\omega\vec{\Phi}_m$$

90° efter!

Belastad synkrongenerator



- Ankarreaktionen gör att \vec{E}_i beror på \vec{I}_a :

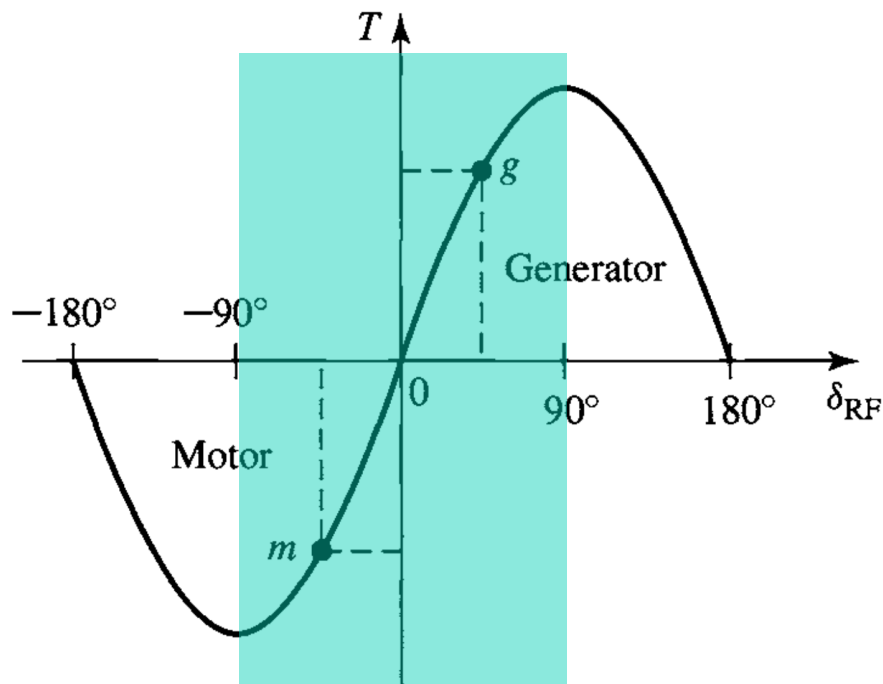
- Tomgång: $|\vec{E}_i| = |\vec{E}_m|$

- Resistiv last: $|\vec{E}_i| < |\vec{E}_m|$

- Resistiv och induktiv last: $|\vec{E}_i| \ll |\vec{E}_m|$

- Konstant $|\vec{E}_i|$ kräver variabelt $|\vec{E}_m|$

Lastvinkel och Rotorns moment, T



Maskinens stabila
arbetsområde

$$T = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\text{poles}}{2} \right)^2 \Phi_R F_f \sin \delta_{RF}$$

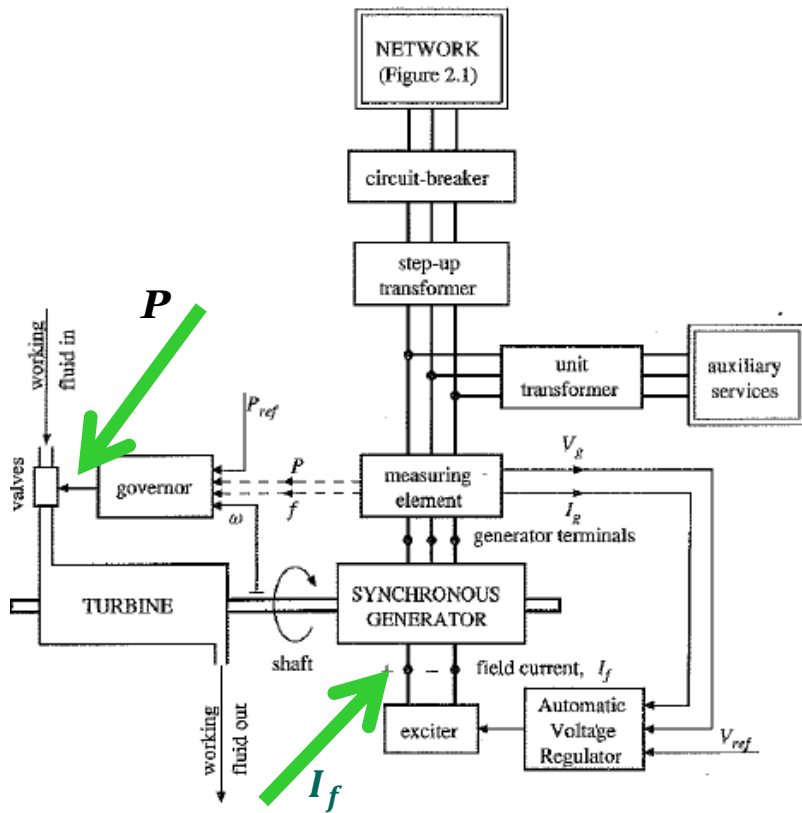
Φ_R resultant air-gap flux per pole
 F_f mmf of the dc field winding
 δ_{RF} electrical phase angle between
 magnetic axes of Φ_R and F_f

Maskinens effekt

$$P = \omega T$$

Mekanisk turbineffekt

Två styrsignaler



How to understand these diagrams?

You may think of a mechanical system, where bars, joints and springs represent the arrows:

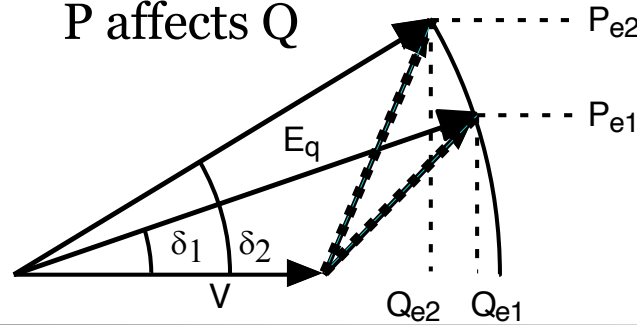
- V = bar with fixed length and position
- E_q = bar with length= $f(I_f)$ and variable angle
- XI = (dotted) spring connecting ends of V and E_q
- V , E_q and XI meet in joints $\rightarrow E_q = V + jXI$ holds

Constant $E_q \rightarrow$ Joint between E_q and XI moves on circular arc (E_q has constant length), when P_e changes

Constant $P_e \rightarrow$ Joint between E_q and XI moves on horizontal line, when E_q changes

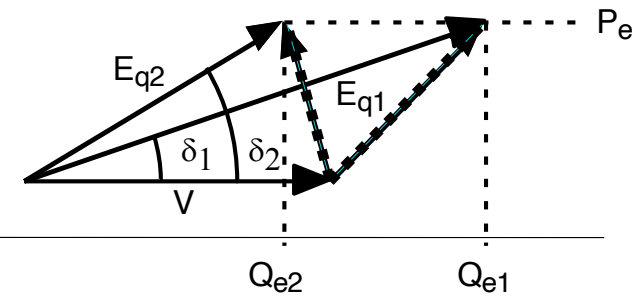
Turbine $P \rightarrow P_e = P$

Here E_q constant
 P affects Q



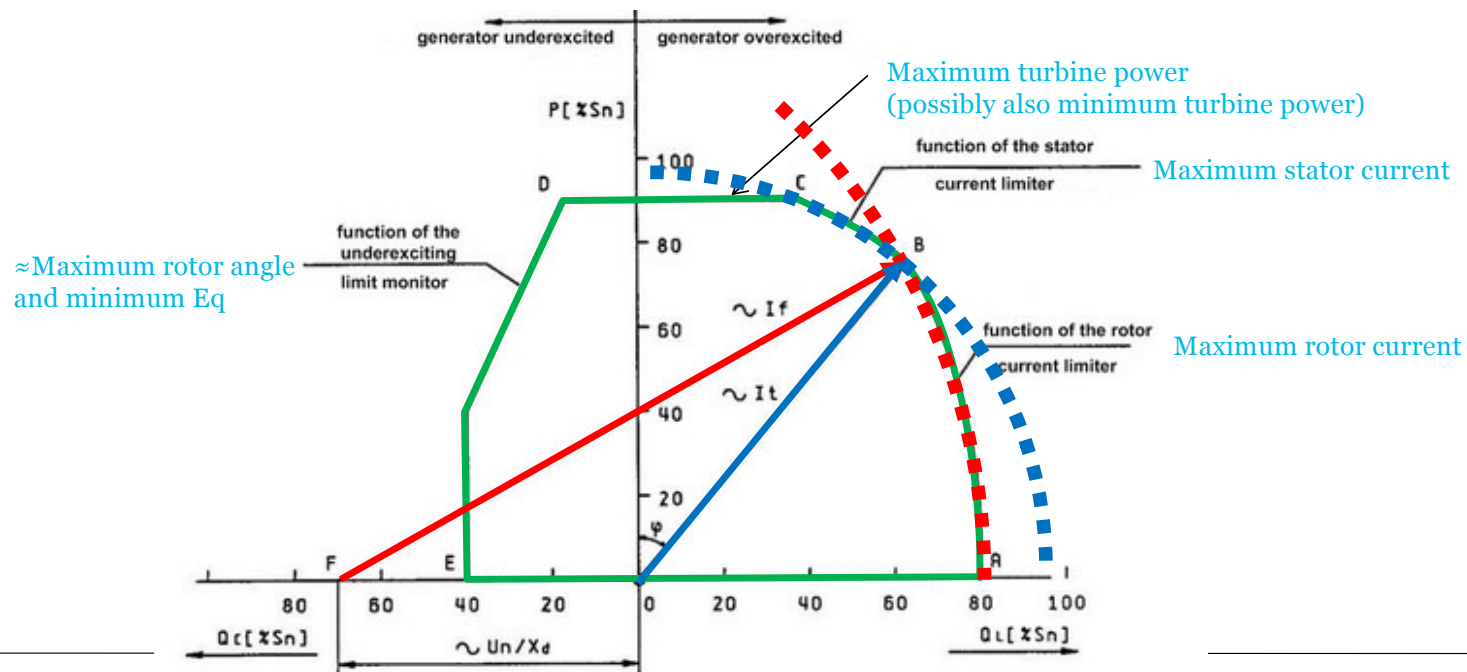
Field current $I_f \rightarrow E_q$

Here P constant
 $Q > 0$ or < 0



Kapacitetsdiagram

- Innesluter alla nåbara arbetspunkter.
- Olika begränsningar ger gränserna.



Source: www.egu-prg.cz

3. Normalisering – Per Unit System pu.

Per Unit system – Per Enhet

- Beräkningar relaterade till maskiner, transformatorer och system av maskiner utförs ofta i form per enhet, d.v.s. med alla relevanta kvantiteter uttryckta som decimalfraktioner av lämpligt valda basvärden.
- Alla vanliga beräkningar räknas sedan ut i dessa per enhetsvärden istället för de välbekanta volt, ampere, ohm, och så vidare. Parametervärden för komponenter hamnar inom snävare gränser.
- Storheter såsom spänning V , ström I , effekt P , reaktiv effekt Q , skenbar effekt $S=VA$, resistans R , reaktans X , impedans Z , conductans G , susceptans B , och admittans Y kan översättas till och från per-unit form enligt:

$$\text{Quantity per unit} = \frac{\text{Actual quantity}}{\text{Base value of quantity}}$$

- Till viss del kan basvärden väljas godtyckligt, men vissa relationer mellan dem måste observeras för att de normala elektriska lagarna ska hålla i systemet per enhet. För ett enfassystem fås:

$$P_{base}, Q_{base}, VA_{base}, = V_{base} I_{base}$$

$$R_{base}, X_{base}, Z_{base}, = \frac{V_{base}}{I_{base}}$$

- Kan bara välja två godtyckligt. Väljer ofta märkeffekt på generator/transformator $S_{base} = VA_{base}$ och spänningsnivå V_{base} . Märkplåten på maskinen.
- Ofta tillhandahåller tillverkare enhetsparametrar per enhet på enhetsbasen. När flera enheter är inblandade måste dock vanligtvis ett godtyckligt val av volt-ampere bas göras och det värdet ska sedan användas för det totala systemet.

Per Unit system - Per Enhet

- När man utför en systemanalys, kan det vara nödvändigt att konvertera de angivna per-enhetsparametervärdena till per-enhetsvärden på den bas som valts för analysen. Följande relationer kan användas för att konvertera värden per enhet (pu) från en bas till en annan.
- Grundtanke;
slå fast en bas för effektnivå:
 $S_{base} = VA_{base}$
justera V_{base} i delsystem

$$(P, Q, VA)_{pu \text{ on base 2}} = (P, Q, VA)_{pu \text{ on base 1}} \left[\frac{VA_{base 1}}{VA_{base 2}} \right]$$

$$(R, X, Z)_{pu \text{ on base 2}} = (R, X, Z)_{pu \text{ on base 1}} \left[\frac{(V_{base 1})^2 VA_{base 2}}{(V_{base 2})^2 VA_{base 1}} \right]$$

$$V_{pu \text{ on base 2}} = V_{pu \text{ on base 1}} \left[\frac{V_{base 1}}{V_{base 2}} \right]$$

$$I_{pu \text{ on base 2}} = I_{pu \text{ on base 1}} \left[\frac{V_{base 2} VA_{base 1}}{V_{base 1} VA_{base 2}} \right]$$

Byte av per unit bas

- Generator and transformer data often on its own (rated) S_{base}
When changing base, physical value is invariant:

$$Z_{\text{p.u.new}} \cdot Z_{\text{basenew}} = Z_{\text{actual}, \Omega} = Z_{\text{p.u.old}} \cdot Z_{\text{baseold}}$$

$$V_{\text{p.u.new}} \cdot V_{\text{basenew}} = V_{\text{actual}, \text{kv}} = V_{\text{p.u.old}} \cdot V_{\text{baseold}}$$

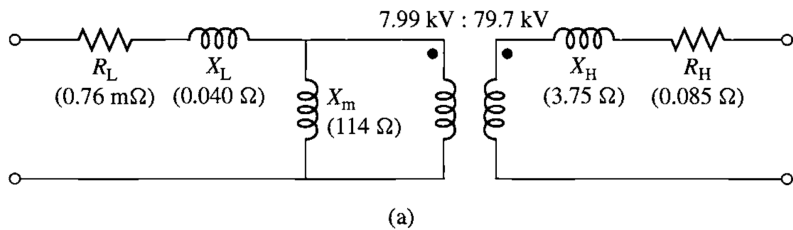
$$I_{\text{p.u.new}} \cdot I_{\text{basenew}} = I_{\text{actual}, \text{kA}} = I_{\text{p.u.old}} \cdot I_{\text{baseold}}$$

$$S_{\text{p.u.new}} \cdot S_{\text{basenew}} = S_{\text{actual}, \text{MVA}} = S_{\text{p.u.old}} \cdot S_{\text{baseold}}$$

Remember that bases are linked: $Z_{\text{base}} = V_{\text{base}}^2 / S_{\text{base}}$

Ett genomräknat exempel

- 100-MVA, 7.97-kV:79.7-kV transformator



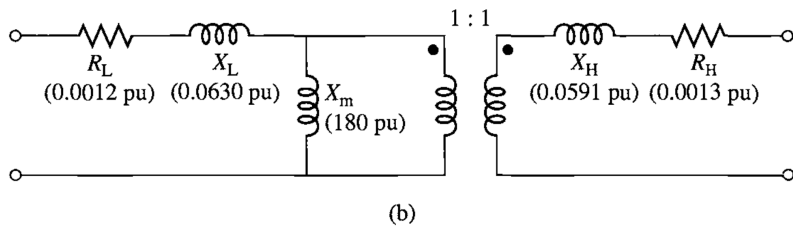
Lågspänningssida

$$VA_{\text{base}} = 100 \text{ MVA} \quad V_{\text{base}} = 7.97 \text{ kV}$$

$$R_{\text{base}} = X_{\text{base}} = \frac{V_{\text{base}}^2}{VA_{\text{base}}} = 0.635 \Omega$$

$$X_L = \frac{0.040}{0.635} = 0.0630 \text{ per unit}$$

$$X_H = \frac{3.75}{63.5} = 0.0591 \text{ per unit}$$



Högspänningssida

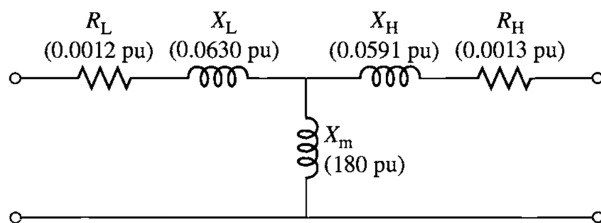
$$VA_{\text{base}} = 100 \text{ MVA} \quad V_{\text{base}} = 79.7 \text{ kV}$$

$$R_{\text{base}} = X_{\text{base}} = \frac{V_{\text{base}}^2}{VA_{\text{base}}} = 63.5 \Omega$$

$$X_m = \frac{114}{0.635} = 180 \text{ per unit}$$

$$R_L = \frac{7.6 \times 10^{-4}}{0.635} = 0.0012 \text{ per unit}$$

$$R_H = \frac{0.085}{63.5} = 0.0013 \text{ per unit}$$



Transformator blir ideal med turns ratio $N=1$

Per Unit normalisering i trefassystemet

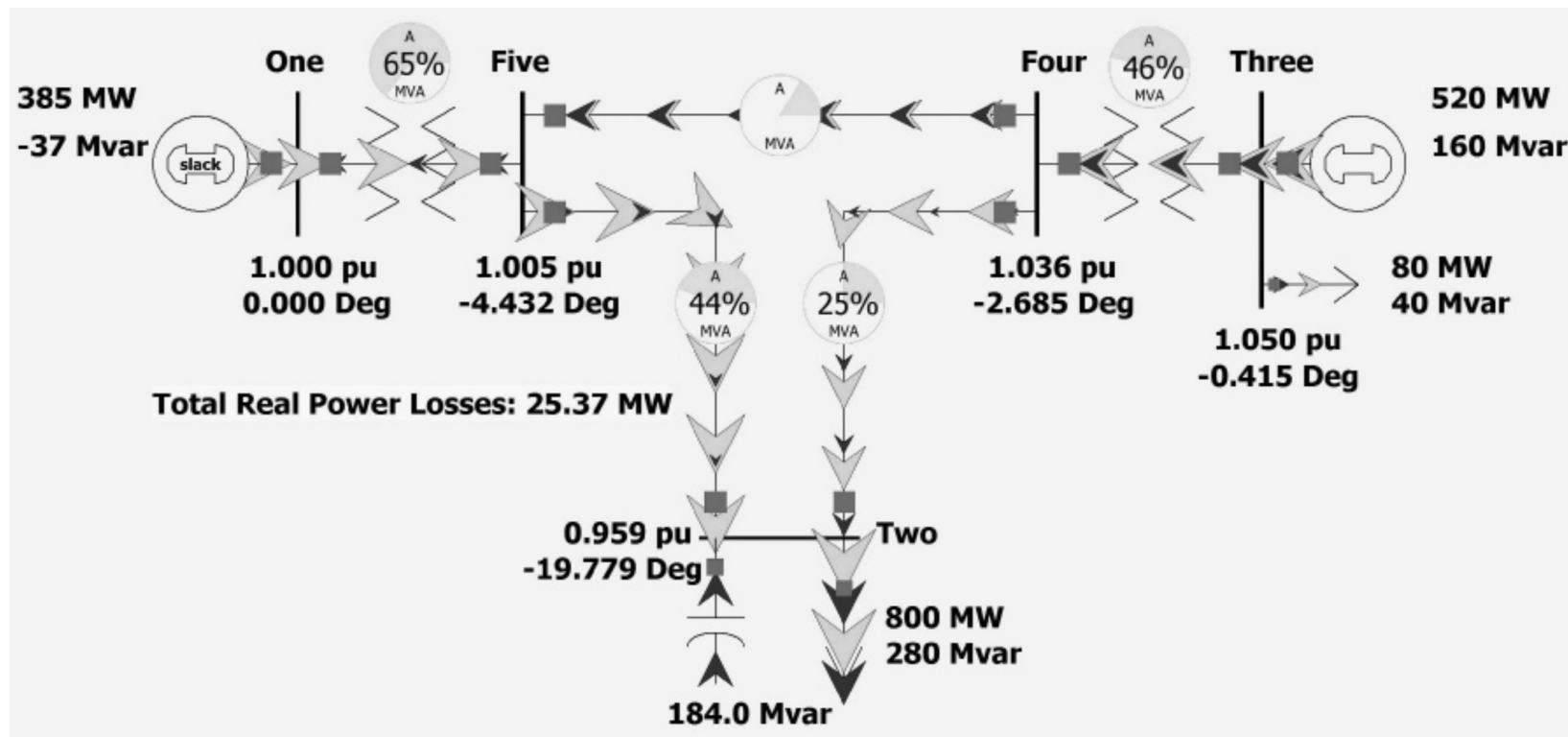
U_{base} = Phase-phase voltage (huvudspänning)

$$S_{base} = \sqrt{3}U_{base} I_{base}, \quad I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3}U_{base}}$$

$$Z_{base} = \frac{U_{ph}}{I} = \frac{U_{base}}{\sqrt{3}I_{base}} = \frac{U_{Base}^2}{S_{base}}$$

$$\text{Per-Unit Value} = \frac{\text{actual value}}{\text{base value}}$$

Ett exempel i PowerWorld



Sammanfattning

1. En synkronmaskin har en roterande magnetiserad ... i en ... med lindningar
2. Roterande fält i lindningar riktade 0, 120, 240° inducerar ... med fas ...
3. Trefasiga sinusströmmar summeras till ... så återledare ...
4. Roterande ... kan representera flöde, spänningar och strömmar i trefasmaskin
5. Momentet på axeln i en trefas synkrongenerator är ..., oberoende av ...
6. Synkrongenerators ekvivalenta schema i en fas: ..., spänningsekvation: ...
7. Lastvinkeln δ är både en ... vinkel $\angle E_m - \angle E_i$ och en ... vinkel $\angle \Phi_m - \angle \Phi_{res}$
8. Vridmoment $T \propto \dots \delta$ Tre driftfall: $\delta > 0$..., $\delta = 0$..., $\delta < 0$...
9. Vinkelhastighet på rotor och spänning är kopplade via antal polpar p : $\omega_{el} = \dots \omega_{mek}$
10. Vid analys av komplexa elkraftsystem är det bekvämt att använda basen ...
11. Med ... systemet får komponentvärdena spridning.

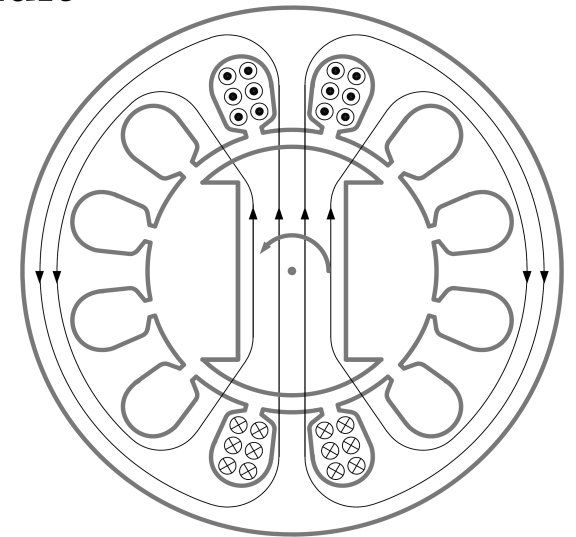
Sammanfattning

1. En synkronmaskin har en roterande magnetiserad rotor i en stator med lindningar
2. Roterande fält i lindningar riktade 0, 120, 240° ger trefasspänningar med fas 0, -120, -240°
3. Trefasiga sinusströmmar summeras till noll så återledare behövs inte
4. Roterande vektorer kan representera flöde, spänningar och strömmar i trefasmaskin
5. Momentet på axeln i en trefas synkrongenerator är konstant, oberoende av θ
6. Synkrongenerators ekvivalenta schema i en fas: AC-källa E_m , reaktans X_{ar} , $E_i = E_m - jX_{ar}I_a$
7. Lastvinkeln δ är både en elektrisk vinkel $\angle E_m - \angle E_i$ och en mekanisk vinkel $\angle \Phi_m - \angle \Phi_{res}$
8. Vridmoment $T \propto \sin\delta$ Tre driftfall: $\delta > 0$ generator drift, $\delta = 0$ tomgång, $\delta < 0$ motordrift
9. Vinkelhastighet på rotor och spänning är kopplade via antal polpar p : $\omega_{el} = (p/2)\omega_{mek}$
10. Vid analys av komplexa elkraftsystem är det bekvämt att använda basen per enhet (pu).
11. Med pu systemet får komponentvärdena mindre spridning.

4. Extramaterial för fördjupad förståelse

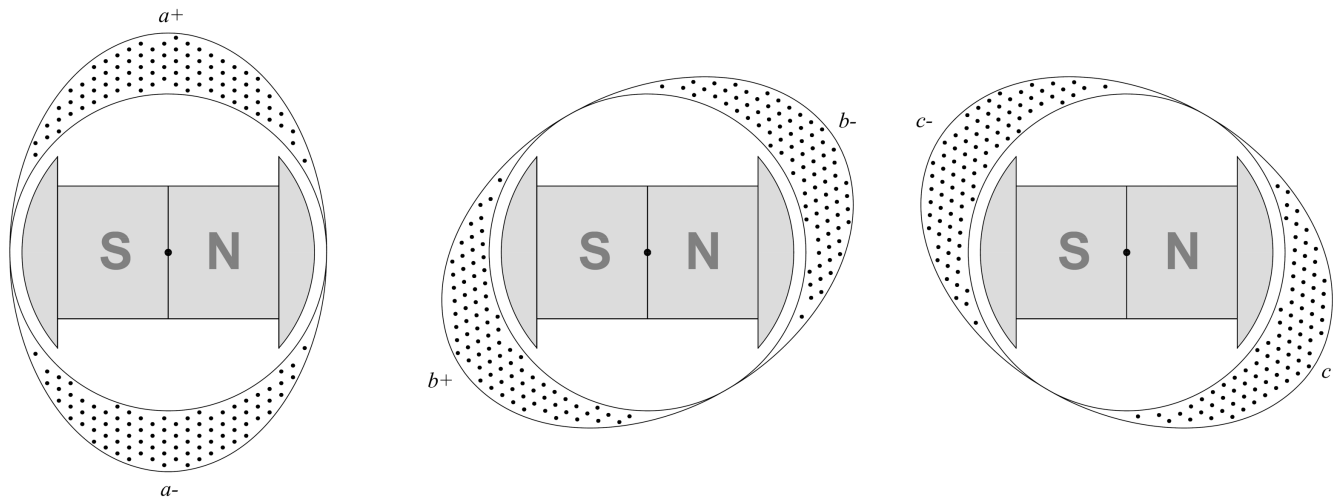
Verklig stator

- I praktiken $N > 1$ varv i lindingarna. I ekvationerna tillkommer N .
- Luft är dålig ledare av magnetiskt flöde, men järn är utmärkt
- Flödet leds i järn med minimalt ”luftgap” där flödet går i luft
- Lindningarna förläggs i ”spår”
- Breda spår/”tänder” främjar ström resp flöde \rightarrow kompromiss
- Statorn i praktiken stapel av stansade plåtar



Utbredda lindningar

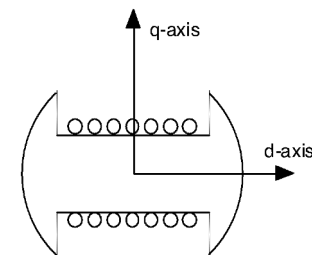
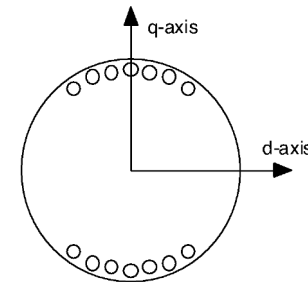
- Alla ekvationer är framtagna för homogent fält
- I en verklig maskin ligger lindningarna kring en cylinder
- ”Sinusformig utbredning” av lindningarna ger fältbild lik den homogena. I praktiken är sinusformen approximativ.



<http://people.ece.umn.edu/users/riaz/animations/abcvec.html>

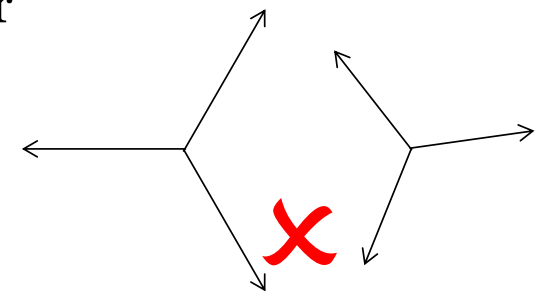
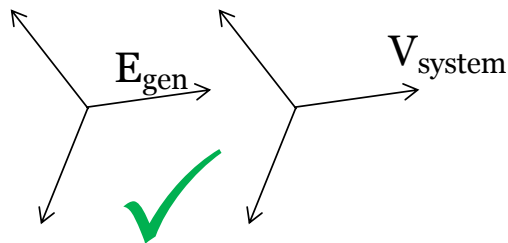
Synchronous generator rotor types

- Round rotor = "Turbo" rotor
 - Two poles
 - High speed - 3000 rpm @ 50Hz
 - Used with steam turbines (e.g. nuclear)
- Salient pole rotor (Swe: utpräglade poler)
 - Many poles e.g. 56 (Harsprånget)
 - Lower speed - e.g. 107 rpm @ 50 Hz
 - Used with hydro turbines
 - Gear ratio with more poles: $\omega_{\text{mechanical}} = \omega_{\text{electrical}} \cdot (2/p)$



Infasning i nätet - synkronisering

- Connecting two (three-phase) Thévenin equivalents
- Aim: Steady-state no-load situation
- No-load if $E_{\text{gen}} = V_{\text{system}} \Leftrightarrow$ the voltages have
 - Same phase order (= wiring correct)
 - Same frequency (= speed correct)
 - Same magnitude (= right magnetization)
 - Same phase (= right timing of connection)
- Think phasors and $E_{\text{gen}} - V_{\text{system}}$ = voltage across breaker

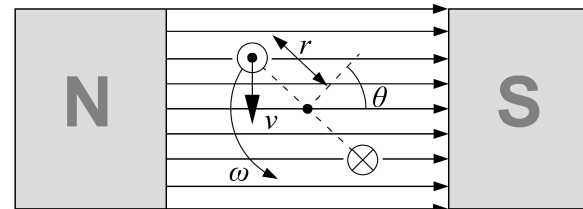
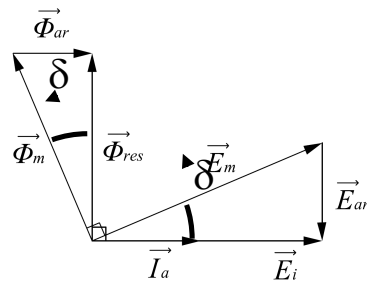


Synkronisering I praktiken

- Procedure (manually in TSFS16, automatic in reality)
 1. Control prime mover to reach correct speed \rightarrow right ω_{el}
 2. Magnetize field (and armature) winding and make magnitude of E_{gen} close to that of V_{system}
 3. Wait until phase angle of E_{gen} is close to that of V_{system}
 4. Connect!
- Closing breaker \Leftrightarrow releasing clutch (sw koppling) in car
- Failure gives high currents and high mechanical stress

Lastvinkel

- Vinkeln mellan \vec{E}_m och \vec{E}_i kallas lastvinkel, betecknas δ
- Vid tomgång är $\vec{E}_m = \vec{E}_i$ och $\delta=0$ och
- Vid generatordrift är $\delta>0$ (vänster figur), vid motordrift är $\delta<0$

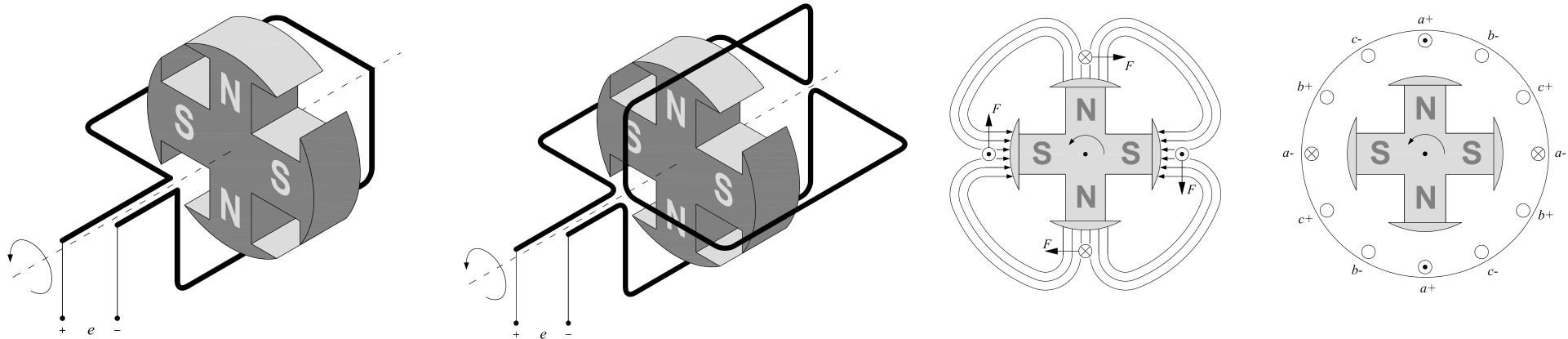


- Vridmomentet beror på $\sin\delta$ och är maximalt vid 90°
 - $T=2Bilr\sin\theta$ (höger figur) gäller alltid ($\delta=0$, $\delta>0$, $\delta<0$)

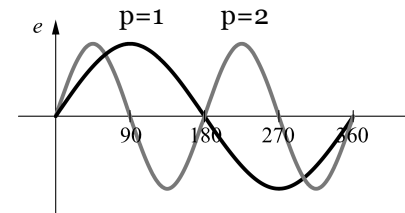
δ är samtidigt vinkel i rummet mellan två flöden och (fas)vinkel mellan två spänningar

Poltal

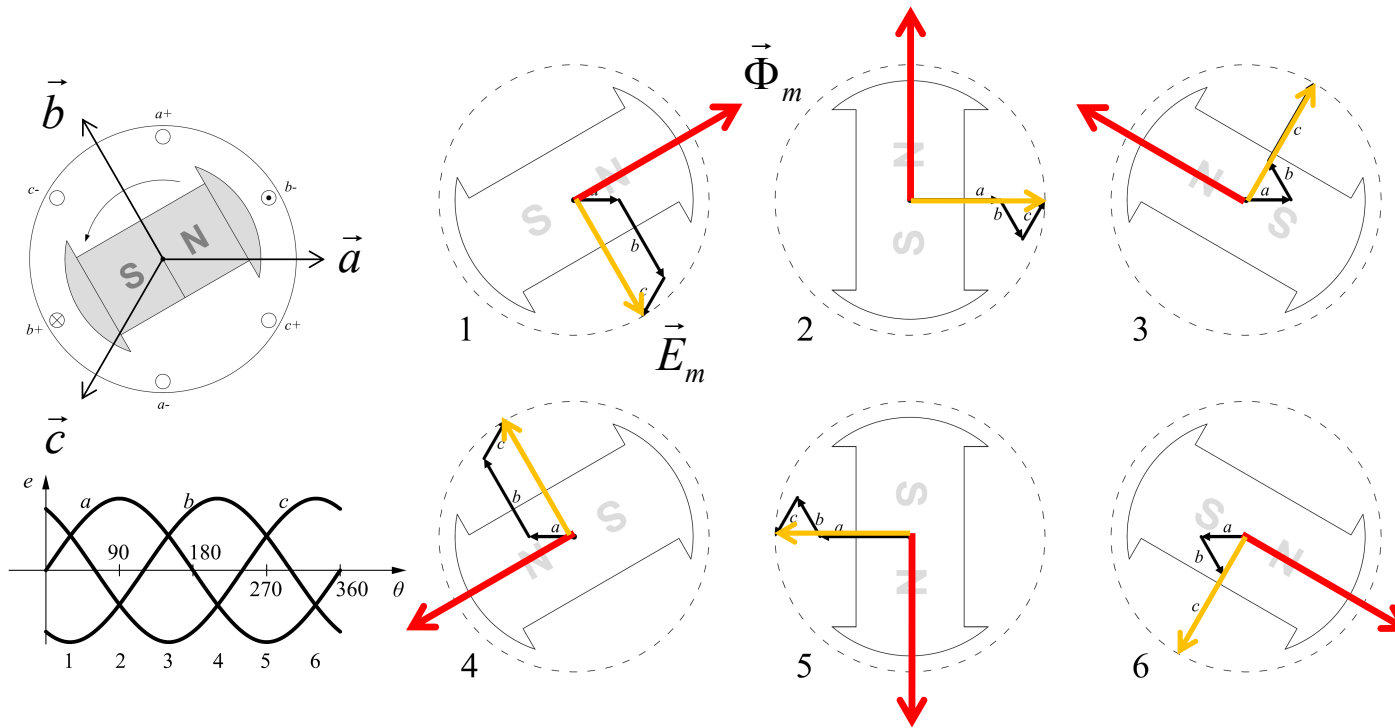
- Hittills $p=1$ polpar i rotorn så $\omega_{el} = \omega_{mek}$, $\omega(\text{rad/s})=2\pi f$ (Hz)
- Nu $p=2$ polpar \Leftrightarrow två N- och S-poler \rightarrow rotorpol upptar 90°



- Statorn ändras likadant
- Ett halvt rotorvarv ger en elektrisk period
- Generellt gäller $\omega_{el} = \frac{p}{2} \omega_{mek}$
- Harsprånget G5 har $p=56$, $f=50\text{Hz}$ \rightarrow $11.2 \text{ rad/s} \Leftrightarrow 107 \text{ rpm}$



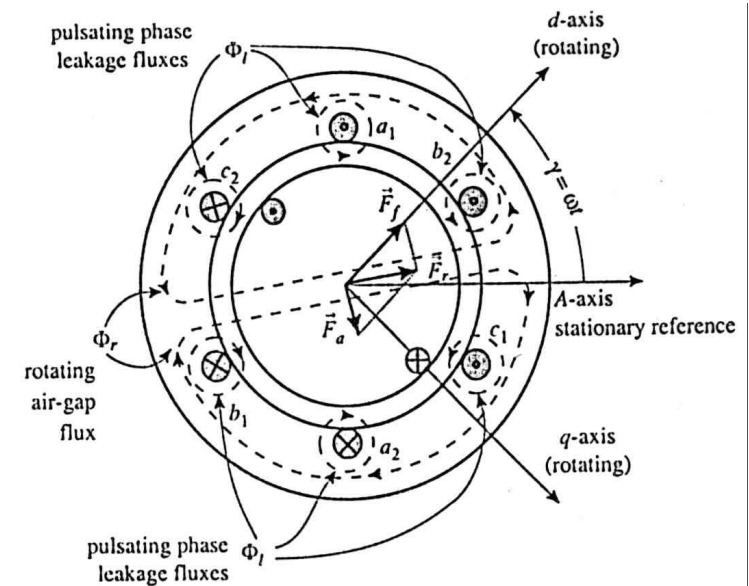
Trefasig synkrongenerator



- \vec{E}_m har konstant längd och kommer 90° efter $\vec{\Phi}_m$

Synchronous generator - loaded

- Load current in stator (is AC, illustration shows one instant) gives “armature reaction” flux \vec{F}_a
- Adds to field flux \vec{F}_f to form resulting air gap flux $\vec{F}_r = \vec{F}_f + \vec{F}_a$
- Each flux is moving \rightarrow an EMF is induced!



Load angle δ

δ_{fr} is a spatial angle between field and air gap flux

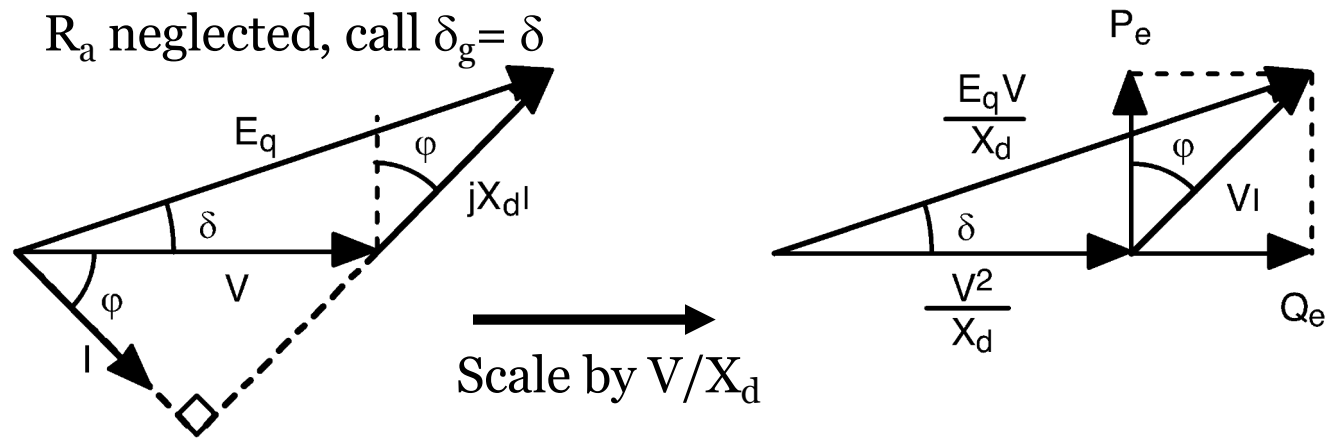
δ_g is a phase angle between $E_q = E_f$ and V

δ_{fr} and δ_g are close, often considered equal

Note

1. δ_{fr} is given relative to rotating reference (rotor)
2. δ_{fr} is a spatial coordinate for a mass – the rotor

Steady state operation



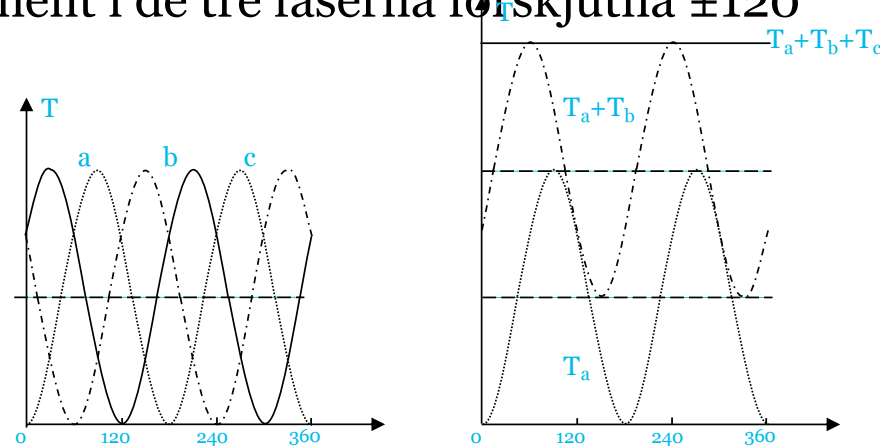
Components of VI :

Vertical $E_q V/X_d \sin\delta = VI \cos\phi = P_e$

Horizontal $E_q V/X_d \cos\delta - V^2/X_d = VI \sin\phi = Q_e$

Trefasig synkronmaskin - moment

- T_{fas} kurvform $\propto \sin\omega t \propto \sin^2(\omega t) \propto 1 - \cos 2\omega t$
- Strömmar och moment i de tre faserna förskjutna $\pm 120^\circ$



- Varje lindning bidrar till vridmomentet $T(t) = T_a(t) + T_b(t) + T_c(t)$
- $T(t)$ är konstant på samma sätt som för tvåfasig maskin

TSFS 17 Elkraftsystem

Föreläsning 2 - Baskraft

<https://isy.gitlab-pages.liu.se/fs/courses/TSFS17/>

Lars Eriksson, Professor
ISY, Fordonssystem