

Forord

Inden elektroteknik anvendes en række modeller, der er udgangspunkt for en matematisk beskrivelse af den fysik elektroteknikken er en del af.

De lærebøger der anvendes er fokuseret på at fremvise den matematiske udgave og udlede matematiske udtryk, der tillader at fysiske størrelse kan beregnes tilnærmet, med disse modeller.

Derved er elektroteknik blevet et fag, hvor nysgerrigheden og undre er afgrænset til de studerende der behersker det matematiske sprog. Forstået ved at læringen og forståelsen af fysikken forventes sker gennem det matematiske sprog.

Dette notat vil bringe grundlæggende elektrotekniske betragtninger frem, der er glemt eller blot udeladt i lærebøgerne. Denne betragtning vil samtidigt udgøre en grundviden, hvorfra teorier og modellen kan kritiseres og teoriens eller modellens anvendelighed kan betragtes.

Dette notat inddrager flere betragtninger og vil kunne understøtte processen hos den studerende i at opnå en bedre forståelse for elektroteknik.

Indholdsfortegnelse

Indhold

Forord	1
Induktion	2
Induktion i relation til en fremmed magnetiseret synkrogeneratoren	3
Model for transformeren	5
Induktion betragtet ved subtransiente og transiente forhold, ved generatornære kortslutninger.	7
Induktion betragtet ved subtransiente og transiente forhold, ved transformernære kortslutninger.	Fejl! Bogmærke er ikke defineret.

Induktion

Pedersen, 2002 redegør for et teorifelt, der angiver induktion ved følgende formel: $= -\frac{d\Phi}{dt} N$.

Kommentar: Det formodes at fortegnet skal ses matematisk.

Induktion er forklaret lidt anderledes i Rathlou, 1946 således, at der gøres opmærksom på at induktion forekommer i 2 forskellige situationer.

Først forklares det negative fortegn (–) der angives til at være en aktion (kræfter), altså at den inducerede spænding vil skabe en reaktion, der modsætter den elektromotoriske kraft egen opståen.

Kommentar: Her tænkes en enkelt leder. Men lederen må nødvendigvis indgå et lukket kredsløb, da dette er forudsætning for at lederen føre strømme.

Melson et. al. Fysik for teknika, 1966 udleder induktion, så det er ændringen af de feltlinjer som den lukkede ledersløjfe udsættes for, som inducerer en elektromotorisk kraft, $E = E$ er 0 V netop der hvor en drejelig ledersløjfe står vinkelret på feltlinierne.

Kommentar: Den beskrevne ledersløjfe antages at have en begrænset udstrækning, således det kun er den del af ledersløjfen som udsættes for et magnetfelt, hvor der induceres en EMK.

Situation 1:

Der induceres en elektromotorisk kraft ved at en leder overskærer feltlinjer. Den største spænding induceres, hvor der overskæres flest feltlinjer pr. tidsenhed. En øjebliksværdi af EMK benævnes, e .

$$e = B * V * L,$$

I praksis sker dette hvor polhjulet passer statorstavene. Således er er den elektromotoriske kraft (E) og polhjulet (B) i fase i forhold til lederens position.

(-) minus tegnet er her udeladt, men det forudsættes, forsat at den inducerede spænding og den deraf følgende strøm vil fremkalde en magnetiskfelt som vil modsatte sig polhullets bevægelse. Dette magnetiske felt er benævnt ankerreaktionen.

Kommentar: I situation 1 tales om en stav placeret i statoren og et konstant felt bevæges forbi statoren.

I situation 2:

Der induceres en elektromotorisk kraft i en vikling ved at feltet ændrer sig (uden at leder overskærer feltlinjer).

$$e = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} N \text{ [V]}$$

Den største E opstår der, hvor feltet ændres størst pr. tidsenhed. Ved en sinus formet ændring af magnetfeltet vil den største ændring pr. tids enhed være at finde, lige der hvor feltet passere nul. Denne inducerede spænding vil derfor ligge 90 gr. efter et sinusformet magnetfelt.

I praksis ses dette bl.a. i transformeren. (-) minustegnet fortæller her at den induceret strøm vil danne et nyt magnetfelt, det vil hindre magnetfeltet i at ændre sig.

Kommentar: I situation 2 tales om en fast vikling og ændring af feltets styrke uden nogen form for bevægelse.

Induktion i relation til en fremmed magnetiseret synkrogeneratoren

P. E. Petersen, 2005 redegør for generatoren forenkede vektordiagram¹. I forbindelse med forklaring af subtransiente strømforhold, fx ved kortslutninger, kan det være en fordel at se EMK ud fra det resulterende felt i generatoren.

Spredningsfeltet og ankerreaktionen forårsager et **spændingsdrop**¹ i generatoren. Spændingsdroppet benævnes ofte som spændingsfald, da spændingsdroppet kan tilnærmet bestemmes efter samme metode som et spændingsfald. Dette spændingsdrop er udtryk for et tab i magnetfeltets styrke, men kan ækvivaleres til en matematisk fiktiv induktiv modstand, som benævnes generatorens induktans. Denne teoretiske induktans betragtes konstant under generatorens normale drift. Spændingsfaldet over denne induktans ved stigende belastningsstrømme giver værdier, som svarer til det spændingsdrop mellem den teoretiske induceret elektromotoriske kraft og klemspændingen.

$$e = -B \times V \times L \times N$$

$$\text{og}$$

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

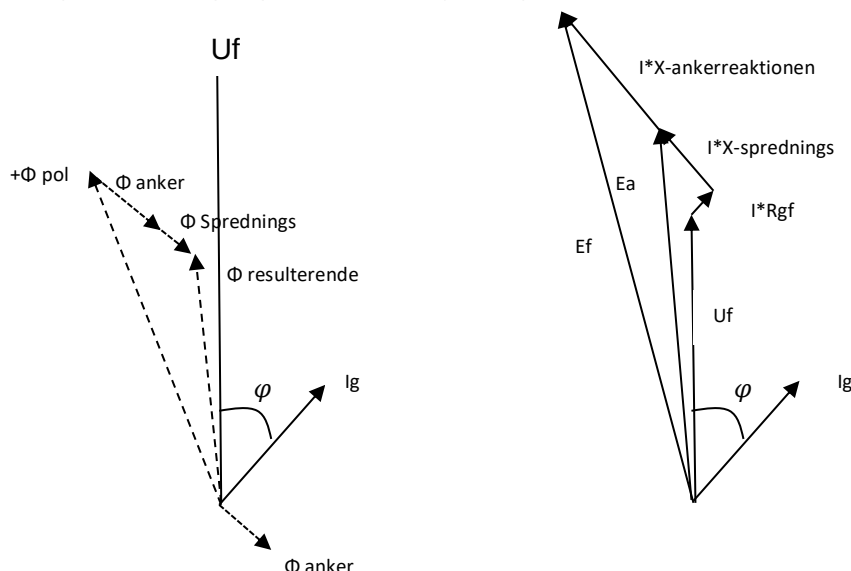
$$Ef = \frac{e_{\max}}{\sqrt{2}}$$

$$Ef = \frac{B_{\max} \times V_{\max} \times L \times N}{\sqrt{2}}$$

$$Ef = U_f \cos \phi + I_g \sin(\phi) \times X_g \sin(90) + I_g \sin(\phi) \times R_g \cos \phi$$

I beregninger kan der tilnærmet ses bort fra R_g , der er forsvinde lille set i forhold til X_g .

Vektordiagram for beregningsmodellen for synkrogeneratoren:



Forklaring:

Spændingsdroppet i generatoren kan relateres til stators indflydelse på polhjulets magnetfeltet, og E_f er forårsaget af det resulterende magnetfelt.

¹ Begrebet spændingsdrop er frit oversat fra engelsk, og kan udlægges således at begrebet spændingsfald kun anvendes ved spændingsfald i bygningsinstallationer og spændingsdrop i distributionsnet.

Ea er udtryk for den resulterende elektromotorisk kraft, før spændingsdroppet over spredningsfeltet.

Vektordiagrammet er en eksagt model. Vektoren U_f er en principvektor og Φ_{pol} er fysisk størrelse. Men disse er bundet til hinanden synkront.

Ef er en værdi som kun kan måles ved tomgang

De viste induceret strømme i statoren, der fremkalder ankerfeltet " Φ_{anker} " der er skabt ud fra det resulterende felt. (modellens opgave er at vise hvorledes det resulterende felt bliver fremkaldt).

Modellen nedenfor omdanner derfor forskellen mellem polhjulsfeltet og det resulterende felt til et spændingsfald eller spændingsstigning ($I_g \times X_a$).

I vektordiagrammet ovenfor er de inducerede spændinger fra henholdsvis feltet fra og polhjulet og det resulterende felt vist direkte.

Petersen, 2005 viser ankerreaktionens variation som funktion af belastningen $\cos\varphi$, i forhold til feltet fra polhjulet, hvilket er en tilnærmet forståelse af begrebet. Da det reelt vil blive vinklen mellem den E_f og strømmen som er $\phi + \alpha$.

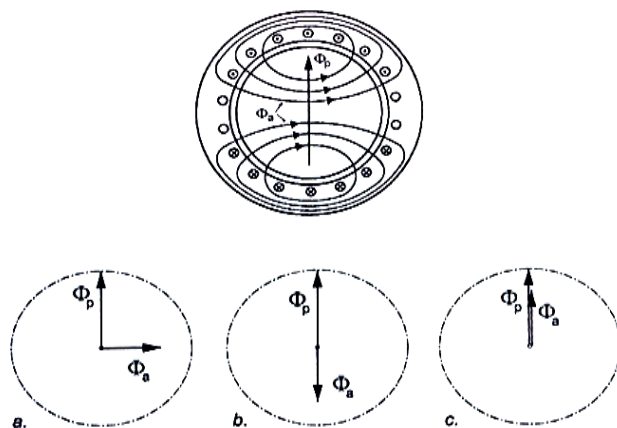


Fig. 4.1.14. Ankerreaktion i synkronmaskine
a. ved resistiv belastning
b. ved induktiv belastning
c. ved kapacitiv belastning.

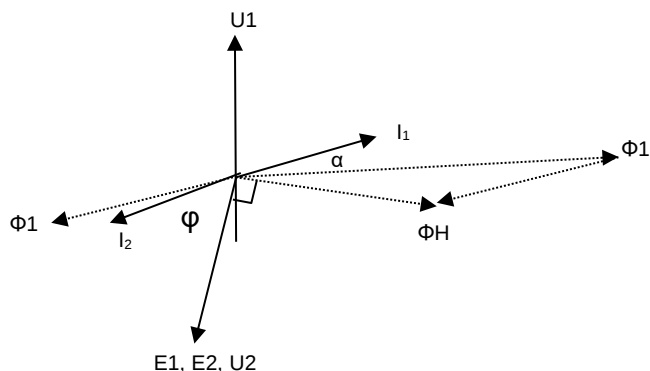
Fig.4.1.14

Kilde: Pedersen, 2005

Model for transformeren

Petersen, 2005 redegør for transformerens simplificerede vektordiagram. I teorifeltet argumenteres for at magnetfeltet ligger præcis 90 gr. på spændingen. Dette er en forenkling og en tilnærmet måde at se forholdene på. En vikling i en transformer er overvejende induktiv. Det betyder at $\cos\phi_k$ typisk vil ligge 75 og 85 gr. Da det er en spole med jernkerne, vil magnetfeltet være forskudt α° efter strømmen. Derved bliver magnetfeltet nærlig forskudt omkring 90°. efter spændingen. Derimod vil den inducerede spænding E_1 ligge præcist 90° efter feltet.

Vektordiagram for beregningsmodellen for transformeren:



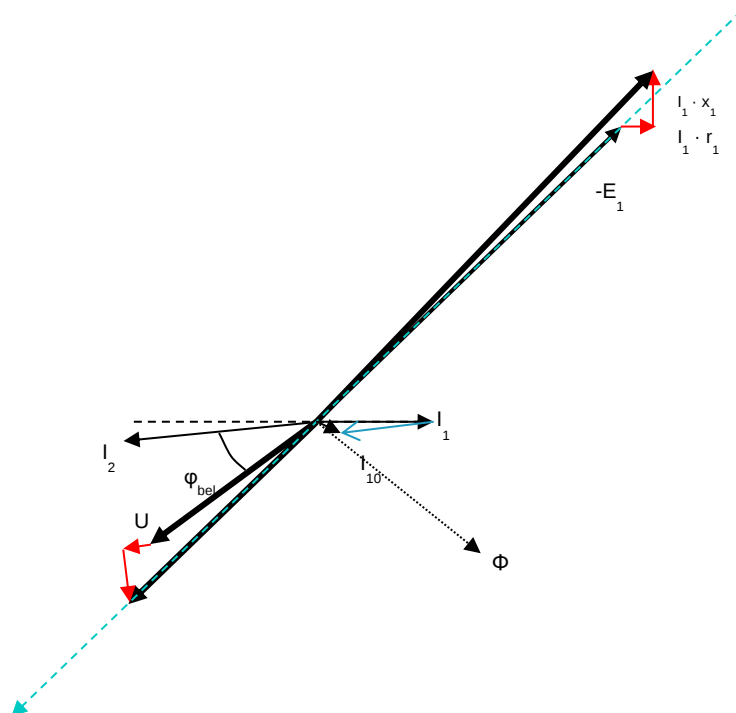
I dette simplificerede vektordiagram er feltlinierne vist med stiplede linjer.

Her antages det at $E_1 = E_2 = U_2$ hvilket er stærkt tilnærmet.

Det bemærkes at hvis spolen var uden jernkerne, ville $\alpha \approx 1$. De magnetiske feltlinier ville da være præcise 180 gr. forskudt for hinanden.

Bemærk at I_1 og I_2 ikke er 180 gr. forskudt. Dette skyldes at I_2' er mindre end I_1 . Differensen er den optagne strøm til magnetisering.

Her er det tilnærmet vist at det er differensen mellem vektorerne $I_{11/1} - I_{10} = I_2'$



Bemærk at det resulterende magnetfelt ikke er vinkelret på spændingen U_1 , men er vinkelret på E_1 .

Magnetfeltets størrelse vil være i proportion til I_{w1} .

Det induktive spændingsfald indeholder også et spændingsdrop forårsaget af tab i magnetfeltet, også benævnt spredningsfeltet.

I praksis kan dette vises ved at E_2 er lidt mindre end E_1

Ved strømtransformere er forbrugeren beskyttet mod disse vikelfejl, så der skal anvendes en målerkerne med klasse 0,2s. Hvilket er udtryk for at den vinkel som strømtransformeren vil ændre – er så lille at fejlen der vil gøre

PH-el rådgivning. September 2024

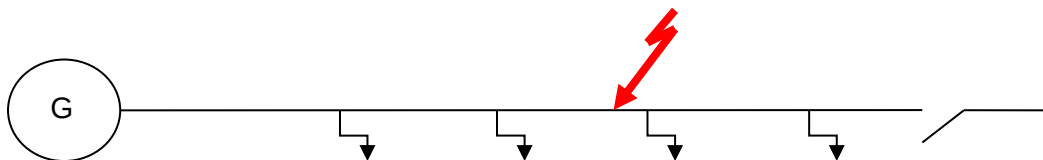
$\cos\phi$ mindre, og derved konverter I_{wl} til I_w er ubetydeligt.

Dette gælder selvfølgelig kun ved induktiv last. Er lasten kapacitiv – vil denne fejl virke til forbrugers fordel.

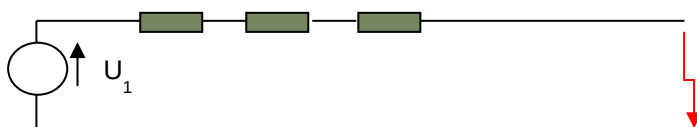
Induktion betragtet ved subtransiente og transiente forhold, ved generatornære kortslutninger.

Under normale forhold kan en kortslutning i nettet betragtes som "en generatorfjern kortslutning". Definitionen på en generator fjernkortslutningsstrøm, er at kortslutningsstrømmen er mindre en 2 gange generatorens fuldlaststrøm (Kringelum, 2006)² Under disse forhold kan ses bort fra den de transiente strømme. Denne betragtning anvender vi på maskinmesterstudiet i vide udstrækninger, ved beregninger af kortslutningsstrømme i installationer eller på distributionsnettet.

Hvis der er tale om en generatorfjern kortslutning, kan Ik beregnes ved Thevenin's regel. Se Petersen, 2006 Elektroteknik 1. kap. 3.3.2

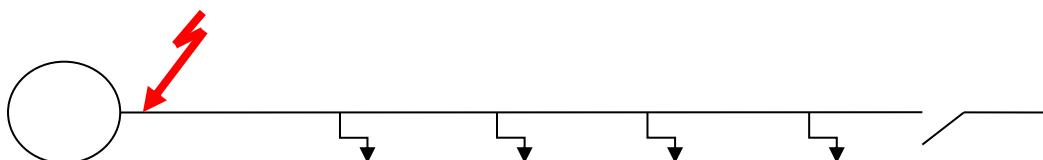


Beregningsmodel, ved Thevenin's regel:



$$I_k = \frac{U_n * C}{\sqrt{3} * (Z_{n\Delta} + Z_{k\Delta} + Z_{T\Delta})}$$

Optræder der kortslutninger i den elektriske installation nær en synkrogenerator, bør man tage hensyn til disse transiente strømme, som kan blive op til 6 til 10 gange den prospektiv kortslutningsstrøm. Fx ombord på skibe eller elektriske installationer i industrier, som har generatorer tilkoblet. Samt ved forhold, hvor generatorer er koblet direkte til distributionsnet, fx ved en decentral kraftvarme værk.



² Kringelum, 2006 = elektroteknik, 6, el-tekniske beregninger, 4. udgave, kap. 2.1, side 16

I disse tilfælde vil det være nødvendigt at beregne de transiente strømme, for at kunne dimensionere generatorbeskyttelsen og andre komponenter, som vil blive påvirket af disse meget store men kortvarige strømme.

Definitionen er givet af C. N Christensens fra 1967, Kortslutninger i 3 faset net.

- Subtransiente: perioden fra 0 – 30 ms
- Transiente: perioden 30 – 150 ms
- Synkrone: periode fra 150 – ca. 1 sek.
- Stationære: over 1 sek.

Problemer med beregningsmodellen

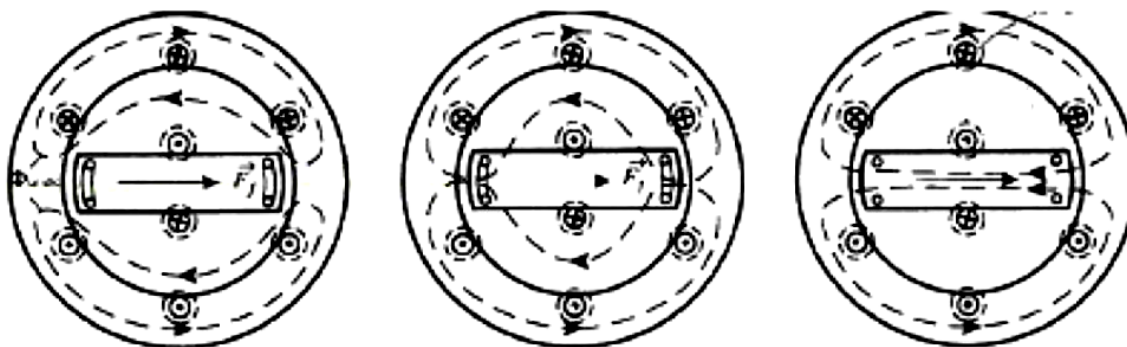
Ved kortslutninger kan fysikken i de første perioder ikke følge med og den omtalte spændingsfald bliver ikke så udtalt som forventet. Dette forhold skal også medtages ved fastlæggelse af transiente strømme.

Hvis synkrongeneratoren kortsluttes, dannes en næsten ren induktiv kreds. Ankerreaktionen vil modarbejde polhjulsfeltet, og efter nogle sekunder vil kortslutningsstrømmen blive begrænset ca. 1-2 gange generatorens fuldlaststrøm. Primært fordi at den induceret elektromotoriske kraft mindskes af det store statormagnetfelt der skabes af den store kortslutningsstrøm i generatorens viklinger, også benævnt ankerreaktionen.

De subtransiente strømme optræder fordi at magnetfeltet om lederne (statorfeltet) har et bevægelsesmønster som i begyndelsen kun begrænset påvirker den induceret elektromotoriske kraft.

Statorfeltet vil foretage en bevægelse fra at løbe i mellemrummet mellem statoren og rotoren til at løbe i rotoren. Denne bevægelse af statorfeltet ind imod rotoren vil inducere strømme i rotorens magnetiseringsviklinger og i praksis øge den indicerede elektromotoriske kraft.

Fig. 1 er en ækvivaleret figur, der viser i 3 situationer, hvorledes at statorfeltet bevæger sig ind imod polhjulet. Denne bevægelse vil i en kort periode inducere elektromotoriske kræfter i magnetiseringsviklinger og øge polhjulets samlede fluxtæthed. Tidsmæssig er denne proces nogle få perioder.



Kilde:

Stabilitetsproblemer i distribusjonsnett. med lokal kraftproduksjon. Tina Davies Bystøl. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Fig. 1 viser at statorfeltet ved en induktiv kortslutning.

I begyndelsen løber statorfeltet i mellemrummet mellem statoren og rotor og efter kort tid finder feltet en kortere vej igennem rotoren, men først skal dette felt nedbrydes.

I denne bevægelse feltlinjer gør fra at løbe mellem polhjul og stator og til at løbe i selv polhjulet, **betyder at feltlinjer overskærer magnetiseringsviklingen, der ligger om rotoren, og feltlinjer vil herved inducere en stor spænding i disse viklinger. Den inducerede spænding er ikke vedvarende, men den er meget stor.** Den inducerede spænding vil

medvirke til i **et kort øjeblik** at forøge magnetiseringsstrømmen i magnetiseringsviklinger, og derved forøger generatoren elektromotoriske kraft.

Beregningsmodellen

Beregningsmodellen anvender forsat Thevenin, men med det forhold at netspændingen er konstant. Den store strøm antages at forårsages af parallelkoblede induktanser, som udkobles efter perioden udløb. Perioderne er 1) den subtransiente periode (x_d''), 2) den transiente periode (x_d'), 3) den synkrone periode (x_d). x_d opgives som % af generatoren stationære

Modellen er udformet, så den elektromotoriske kraft er konstant. den store induktive kortslutningsstrøm tænkes fremkaldt ved at 3 transiente modstande er koblet i parallel. Strømændringen fås ved at udkoble x'' efter 30 ms, x' efter 300 ms og x efter ca. 1,3 sek.

$$X_g = \frac{U_n}{\sqrt{3} \times I_{g1/1}}$$

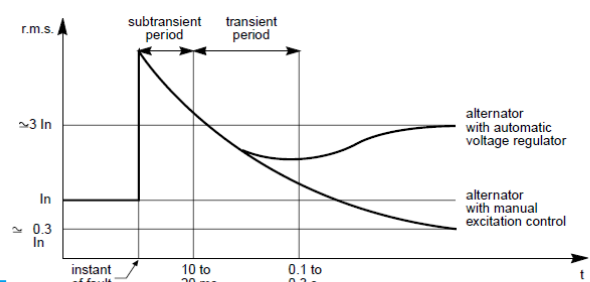
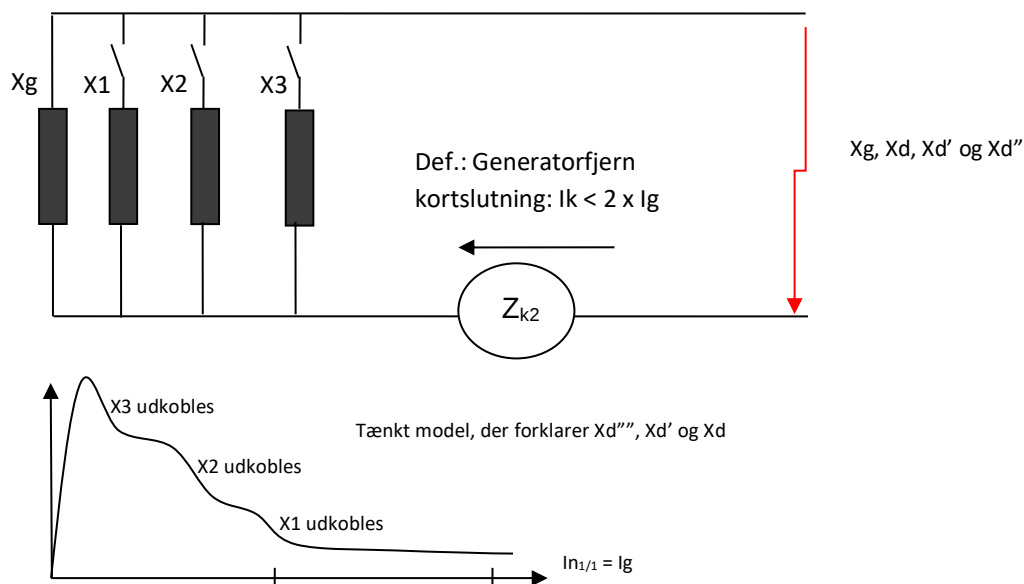


fig. J1-2: establishment of short-circuit current for a three-phase short circuit at the terminals of an alternator.

* depending on the characteristics of the particular machine.

X_g [er den reaktans der optræder under normaldrift]

$$x_d = \frac{\frac{1}{\frac{1}{X_g} + \frac{1}{X_3}}}{X_g} \times 100 \text{ (angivet i \% af } X_g)$$

$$x_d' = \frac{\frac{1}{\frac{1}{X_g} + \frac{1}{X_3} + \frac{1}{X_2}}}{X_g} \times 100 \text{ (angivet i \% af } X_g)$$

$$x_d'' = \frac{\frac{1}{\frac{1}{X_g} + \frac{1}{X_3} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_1}}}{X_g} \times 100 \text{ (angivet i \% af } X_g)$$

$$I_k = I_G \times \frac{100}{x_d}$$
$$I_k' = I_G \times \frac{100}{x_d'}$$
$$I_k'' = I_G \times \frac{100}{x_d''}$$

Eks:

Data for en generator: ud fra $S_{Gn} = 693 \text{ kVA}$ og $U_n = 3 \times 400 \text{ V}$

$I_G = 1000 \text{ A}$

$x_d'' = 9 \%$

$$I_k'' = I_G \times \frac{100}{x_d''} = 1000 \times \frac{100}{9} = 11.110 \text{ A} = 11.1 \text{ kA}$$

Eller anvende den model vi normalt anvender ved beregning af I_k hvor der indgår transformer impedans)

$$Z_G'' = \frac{U_n^2}{S_{Gn}} \cdot \frac{x_d''}{100} = \frac{400^2}{693 \cdot 10^3} \cdot \frac{9}{100} = 20,8 \text{ m}\Omega$$
$$I_k'' = \frac{U_f}{Z_G''} = \frac{230 \text{ V}}{20,8 \text{ m}\Omega} = 11,1 \text{ kA}$$

ⁱ Petersen, 2005: Elektriske maskiner fig. 4.1.15 og 4.1.16.