

gedifferentieerd leerpakket

# elektriciteit

## 4 Wisselstroommachines

Enkel voor klasgebruik.

K. Standaert  
F. Van der Borgh



uitgeverij de boeck

Enkel voor klasgebruik.

3de druk, 3de oplage 2004

© 2004 Uitgeverij De Boeck nv, Antwerpen

Verantwoordelijk uitgever: Uitgeverij De Boeck nv, Lamorinièrestraat 31-37, 2018 Antwerpen

Alle rechten voorbehouden. Behoudens de uitdrukkelijk bij wet bepaalde uitzonderingen mag niets uit deze uitgave worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, op welke wijze ook, zonder de voorafgaande en schriftelijke toestemming van de uitgever.

Wettelijk depot: D/2002/9442/552

ISBN 90 455 0552 5

NUR 178

# Inhoud

Concept	5
Algemene inleiding	7
<b>Leereenheid 1</b>	<b>9</b>
<b>Synchrone wisselstroomgeneratoren (alternatoren)</b>	<b>9</b>
Wegwijzer	9
1.1 Bepaling	10
1.2 Principewerking	10
1.3 Ankerwikkelingen	13
1.3.1 Principeschakeling van een eenfasige wikkeling	13
1.3.2 Principeschakeling van een driefasige wikkeling	16
1.4 Het verkrijgen van een sinusvormige wisselspanning	18
1.4.1 Verbreden van de spoelzijden	18
1.4.2 Vorm van de luchtspleet	19
1.4.3 Verkorten van de wikkelspoed	20
1.5 Elektrische grootheden	20
1.5.1 Frequentie van de opgewekte spanning	20
1.5.2 Grootte van de gegenereerde spanning per fasewikkeling	21
1.6 Gedrag van de synchrone generator bij belasting	23
1.6.1 Ankerreactie	23
1.6.2 Equivalente keten	25
1.6.3 Opbouw van het vectordiagram	27
1.6.4 Spanningsdiagrammen	28
1.7 Karakteristieken van een synchrone generator	29
1.7.1 Nullastkarakteristiek (magnetische karakteristiek)	29
1.7.2 Uitwendige karakteristiek	30
1.7.3 Kortsluitkarakteristiek	31
1.7.4 Regelkarakteristiek	31
1.8 Vermogen en rendement van wisselstroomgeneratoren	32
1.8.1 Vermogen	32
1.8.2 Rendement	32
1.9 Parallel schakelen van synchrone generatoren	34
1.9.1 Parallel schakelen van eenfasige synchrone generatoren	34
1.9.2 Parallel schakelen van driefasige synchrone generatoren	36
1.10 Spanningsregeling van synchrone generatoren	43
1.10.1 Algemeenheden	43
1.10.2 Voorbeelden van automatische spanningsregeling	44
1.11 Koeling van generatoren	46
1.12 Voorbeelden	47
1.13 Toepassingen	49
1.14 Diagnostische toets	50
1.15 Herhalingstaken – Basis	50
1.16 Verrijkingsoopdrachten	51
Synthese	52

<b>Leereenheid 2</b>	55
<b>Transformatoren</b>	55
Wegwijzer	55
2.1 Bepaling	56
2.2 Principiële samenstelling en werking van een eenfasetransformator	56
2.2.1 Principiële samenstelling	56
2.2.2 Principiële werking	56
2.3 Werking van de ideale transformator	57
2.3.1 De ideale transformator bij nullast	57
2.3.2 De ideale transformator bij belasting	59
2.4 Werking van de niet-ideale eenfasetransformator	60
2.4.1 De niet-ideale transformator bij nullast	60
2.4.2 De niet-ideale transformator bij belasting	62
2.5 Opbouw van de equivalente keten van een transformator	64
2.5.1 Principeschema	65
2.5.2 Opbouw van de equivalente kring	65
2.5.3 Bepalen van de elementen van de equivalente keten	66
2.6 Uitwendige karakteristiek van de eenfasetransformator	68
2.7 Rendement van eenfasetransformatoren	69
2.8 Driefasetransformatoren	71
2.8.1 Schakelen van driefasetransformatoren	72
2.8.2 Parallel schakelen van transformatoren	77
2.9 Bijzondere schakelingen	79
2.9.1 De V-schakeling	79
2.9.2 De Scottschakeling	80
2.10 Speciale transformatoren en transformatorschakelingen	81
2.10.1 De spaartransformator of autotransformator	81
2.10.2 De regeltransformator	82
2.10.3 De meettransformatoren	83
2.10.4 De veiligheidstransformator	84
2.10.5 De speelgoedtransformator (kortsluitvaste transformator)	84
2.10.6 De scheidingstransformator	84
2.10.7 De lastransformator	85
2.10.8 De impulstransformator	86
2.11 Constructiebijzonderheden bij transformatoren	87
2.11.1 De magnetische keten	87
2.11.2 De wikkelingen	89
2.11.3 Koeling van HS-vermogenstransformatoren	91
2.12 Spanningsregeling bij transformatoren	94
2.13 Voorbeelden	95
2.14 Toepassingen	97
2.15 Diagnostische toets	98
2.16 Herhalingstaken – Basis	98
2.17 Verrijkingsopdrachten	98
Synthese	99
<b>Leereenheid 3</b>	103
<b>Driefasige inductiemotoren</b>	103
Wegwijzer	103
3.1 Beknopte omschrijving	104
3.2 Draaiveld	106
3.2.1 Definiëring	106
3.2.2 Ontstaan van een draaiveld	106

3.3	Invloed van een draaiveld op een rotorwikkeling	108
3.3.1	Bewikkelde open rotorketen	109
3.3.2	Geblokkeerde rotor met rotorwikkeling aangesloten op weerstanden	110
3.3.3	Vrijgelaten rotor met rotorwikkeling aangesloten op weerstanden	110
3.4	Slip	110
3.5	Elektrisch vervangschema van de driefasige asynchrone driefasige inductiemotor (equivalente keten)	112
3.6	Koppel-slipkarakteristiek	115
3.7	Vectordiagram	120
3.7.1	Nullastvectordiagram	120
3.7.2	Vectordiagram van een belaste motor	120
3.7.3	Cirkeldiagram	121
3.8	Vermogen en rendement	125
3.8.1	Statorvermogens	125
3.8.2	Rotorvermogens	126
3.8.3	Rendement	126
3.9	Types van driefasige inductiemotoren	128
3.9.1	Schakelen van de statorspoelen	128
3.9.2	Motoren met kortsluitanker (KA-motoren)	130
3.9.3	Motoren met bewikkelde rotoren	132
3.10	Aanlopen van driefasige inductiemotoren	135
3.10.1	Algemeenheden	135
3.10.2	Direct aanzetten van driefasige motoren	136
3.10.3	Aanzetten van driefasige inductiemotoren met aanloopstroombeperving	137
3.11	Regeling van de rotatiefrequentie bij driefasige inductiemotoren	143
3.11.1	Principiële snelheidsregelmethoden	143
3.11.2	Beoordelingscriteria	149
3.12	Elektrisch remmen	152
3.12.1	Tegenstroomremmen	152
3.12.2	Gelijkstroomremmen	153
3.12.3	Remming door zelfbekrachtiging	154
3.12.4	Remming door hypersynchrone werking	155
3.12.5	Remming door hyposynchrone schakelwijze	155
3.12.6	Remming door eenfasige aansluiting	156
3.13	Bepalen van de slip	156
3.13.1	Met een draaispoel-mV-meter	156
3.13.2	Met een ampèremeter	157
3.13.3	Met een stroboscoop	157
3.14	Elektrische beveiliging van motoren	158
3.15	Storingen	158
3.15.1	De lagers lopen warm	158
3.15.2	De temperatuur van de stator loopt te hoog op	158
3.15.3	Het normale werkkoppel wordt niet bereikt	158
3.15.4	De motor loopt niet aan	158
3.15.5	De rotatiefrequentie is te klein	158
3.16	Speciale driefasige inductiemotoren	159
3.16.1	Remmotoren	159
3.16.2	De lineaire inductiemotor	161
3.17	Voorbeelden	163
3.18	Toepassingen	167
3.19	Diagnostische toets	168
3.20	Herhalingstaken – Basis	168
3.21	Verrijkingsopdrachten	169
	Synthese	170

<b>Leereenheid 4</b>	177
<b>Driefasige synchrone motoren</b>	177
Wegwijzer	177
4.1 Principewerking	178
4.2 Equivalente keten van de synchrone motor	179
4.3 Regeling van de arbeidsfactor van een synchrone motor	180
4.4 Karakteristieke krommen	182
4.4.1 De V-krommen	182
4.4.2 Het koppel	183
4.5 Gedrag van de synchrone motor tijdens de werking	184
4.5.1 Onbelaste motor	184
4.5.2 Belaste motor	184
4.6 Verbeteren van de arbeidsfactor van een installatie met de synchrone motor	185
4.7 Aanlopen van de synchrone motor	186
4.7.1 Met hulpmotor	186
4.7.2 Als asynchrone motor	186
4.7.3 Voedingsnet met veranderlijke frequentie	187
4.8 Speciale driefasemotor: gesynchroniseerde asynchrone motor	187
4.8.1 Principewerking	187
4.8.2 Mogelijke schakelingen van rotorwikkelingen	187
4.9 Toepassingsgebied	188
4.10 Voorbeelden	188
4.11 Toepassingen	189
4.12 Diagnostische toets	189
4.13 Herhalingsstaken – Basis	189
4.14 Verrijkingsoopdracht	190
Synthese	191
<b>Leereenheid 5</b>	195
<b>Eenfasige motoren</b>	195
Wegwijzer	195
5.1 De eenfasige inductiemotor: algemene achtergronden	196
5.1.1 Samenstelling	196
5.1.2 Principewerking van een eenfasige inductiemotor met eenfasige statorwikkeling gevoed door een eenfasig net	196
5.1.3 Principewerking van een inductiemotor met een tweefasige motorwikkeling gevoed door een tweefasig net	199
5.2 Eenfasige inductiemotortypes	201
5.2.1 De condensatormotor	201
5.2.2 De spleetpoolmotor of veldverdringingsmotor	203
5.3 Wisselstroomcommutatormotoren	204
5.3.1 De seriewisselstroommotor	205
5.3.2 De repulsiemotor	206
5.3.3 De motor met trilcontact	207
5.4 De driefasige motor gebruikt als eenfasige motor	207
5.5 Eenfasige synchrone motoren	209
5.5.1 De synchrone motor met permanente magneetrotor	209
5.5.2 De reluctantiemotor	209
5.5.3 De hysteresismotor	210
Synthese	211

<b>Leereenheid 6</b>	215
<b>Aanvullingen</b>	215
Wegwijzer	215
6.1 Aggregaten of machineomzetters	216
6.1.1 Situering	216
6.1.2 Motor-generatoraggregaten	216
6.1.3 Voorbeelden van aggregaten	217
6.1.4 Bijzondere constructie	217
6.2 De magnetische versterker	218
6.2.1 Bepaling	218
6.2.2 Samenstelling	218
6.2.3 Principewerking	219
6.2.4 Praktische constructievormen	220
6.2.5 Enkele praktische schakelingen met transductoren	221
6.3 De stuurbare transformator	223
6.4 Toepassingen	224
6.5 Diagnostische toets	224
6.6 Herhalingstaken – Basis	224
6.7 Verrijkingsoopdrachten	225
Synthese	226
<b>Addendum</b>	229

Enkel voor klasgebruik.

### **Bronvermelding illustraties**

3E-Antwerpen: p. 9, p. 177, p. 196 (fig. 243), p. 215, p. 226

Pauwels Trafo: p. 55, p. 90 (fig. 127), p. 91, p. 92

Siemens: p. 103, p. 104 (fig. 134a), p. 105 (fig. 137), p. 127, p. 128 (fig. 159), p. 149 (fig. 205b), p. 173

CET-motoren: p. 105 (fig. 135), p. 160

ABB-motoren: p. 105 (fig. 136a-b), p. 133 (fig. 168a)

Lafert-motoren: p. 195

Enkel voor klasgebruik.



# Addendum

## Gebruikte symbolen en eenheden

<i>Grootheid</i>	<i>Symbol</i>	<i>Eenheid</i>	<i>Symbol</i>
oppervlakte	$A$	vierkante meter	$m^2$
snelheid	$v$	meter per seconde	$m/s$ ( $m s^{-1}$ )
hoeksnelheid	$\omega$	radialen per seconde	rad/s
pi	$\pi$	onbenoemd	22/7
effectieve waarde van de klemspanning	$U$	volt	V
momentele of ogenblikswaarde van de spanning	$u$	volt	V
elektromotorische kracht of gegeneerde spanning	$E$	volt	V
spanning van zelfinductie	$E_L$	volt	V
effectieve waarde van de stroomsterkte	$I$	ampère	A
momentele of ogenblikswaarde van de stroomsterkte	$i$	ampère	A
gelijkstroomweerstand	$R$	ohm	$\Omega$
inductantie	$X_L$	ohm	$\Omega$
capacitantie	$X_C$	ohm	$\Omega$
impedantie	$Z$	ohm	$\Omega$
admittantie	$Y$	siemens	S
susceptantie	$B$	siemens	S
conductantie	$G$	siemens	S
resistiviteit	$\rho$	ohmmeter	$\Omega m$
reluctantie	$R_m$	1/henry	1/H
fluxdichtheid	$B$	weber per vierkante meter of tesla	$Wb/m^2$ of T
magnetische flux	$\phi$	weber of voltseconde	Wb of Vs
coëfficiënt van zelfinductie	$L$	henry	H
capaciteit	$C$	farad	F
aantal polen	$p$		
periode	$T$	seconde	s
frequentie	$f$	hertz	Hz ( $s^{-1}$ )
tijd	$t$	seconde	s
aantal windingen	$N$		
rotatiefrequentie	$n$	omwentelingen per seconde	omw/s ( $s^{-1}$ )
absolute permeabiliteit van de middenstof	$\mu$	henry per meter	H/m
overspanningsfactor	$Q$	onbenoemd	
golflengte	$\lambda$	meter	m
elektrische graad	$1^\circ \text{ el}$		
meetkundige graad	$1^\circ \text{ m}$		

### Gebruikte symbolen en eenheden

<i>Grootheid</i>	<i>Symbol</i>	<i>Eenheid</i>	<i>Symbol</i>
hoeveelheid elektriciteit	$Q$	ampère-uur	Ah
momenteel vermogen	$p$	watt	W
gemiddeld actief vermogen	$P$	watt	W
blind of reactief vermogen	$Q$	voltampère reactief	var
schijnbaar vermogen	$S$	voltampère	VA
jouleverlies	$P_j$	watt	W
actieve energie	$W_a$	wattuur	Wh
reactieve energie	$W_r$	varuur	varh
rendement	$\eta$	onbenoemd	
stroomvector	$\vec{I}$		
spanningsvector	$\vec{U}$		
operatorsymbool	$j$		
stroomsterkte of spanning in complexe uitdrukking	$\bar{I}$ of $\bar{U}$		

### Het Griekse alfabet

<i>Naam van de letters</i>	<i>Hoofdletters</i>	<i>Kleine letters</i>
alfa	A	$\alpha$
bèta	B	$\beta$
gamma	Γ	$\gamma$
delta	Δ	$\delta$
epsilon	E	$\epsilon$
dzeta	Z	$\zeta$
eta	H	$\eta$
theta	Θ	$\theta$
iota	I	$\iota$
kappa	K	$\kappa$
lambda	Λ	$\lambda$
mu	M	$\mu$
nu	N	$\nu$
ksi	Ξ	$\xi$
omikron	O	$\omicron$
pi	Π	$\pi$
ro	P	$\rho$
sigma	Σ	$\sigma$
tau	T	$\tau$
upsilon	Υ	$\upsilon$
phi	Φ	$\varphi$
khi	X	$\chi$
psi	Ψ	$\psi$
omega	Ω	$\omega$

# Concept

De moderne didactiek en het realiseren van de vakoverschrijdende eindtermen 'leren leren' en 'sociale vaardigheden' vragen de leerkracht zo veel mogelijk af te stappen van een uniforme klassikale aanpak om zodoende rekening te kunnen houden met de verschillen die er tussen leerlingen bestaan. De ene leerling heeft meer voorkennis, de andere werkt vlugger; de ene kan beter zelfstandig werken, terwijl de andere meer steun en structuur nodig heeft. Het hoeft ook geen betoog dat de ene meer aankan dan de andere. De moderne onderwijskunde geeft in dit opzicht duidelijk aan dat het rendement van ons onderwijs nog aanmerkelijk kan toenemen, meer bepaald dat de succesbeleving voor de leerlingen betekenisvol kan stijgen met als logisch gevolg dat het aantal mislukkingen gevoelig daalt.

Deze inzichten omzetten op een manier die haalbaar is in de dagelijkse praktijk, heeft een voorstudie noodzakelijk gemaakt waarbij wij ons verdiept hebben in verschillende systemen van differentiatie binnen de klas.

Het systeem dat daaruit voortvloeide, werd ten slotte uitvoerig uitgetest in de reële klaspraktijk. Het concept van dit gedifferentieerde leerpakket ziet eruit als volgt.

Eerst en vooral werd de leerstof ingedeeld in *leereenheden*, die telkens een afgerond leerstofgeheel vormen. Voor elke leereenheid zijn *basis*- en *uitbreidingsdoelstellingen* voorzien. Op die manier wordt de differentiatie in moeilijkheidsgraad ingebracht. Het is de bedoeling dat zo veel mogelijk leerlingen een behoorlijk resultaat halen op de basisdoelstellingen. De idee van beheersingsleren staat daarvoor duidelijk model.

Een essentiële pijler om een zo groot mogelijk rendement van de basis te bereiken, is het inbrengen van diagnostische (formatieve) toetsen. Het grote belang hiervan verantwoordt het afzonderlijke *toetsenboekje*. Deze toetsen hebben geen beoordelende functie, maar dienen louter als hulpinstrument waarmee de leerling zelf kan controleren in hoeverre hij de doelstellingen heeft bereikt. Aan de andere kant bieden zij ook aan de leerkracht een duidelijker zicht op die aspecten van de leerstof die nog verder of anders moeten worden aangepakt. De toetsen hebben dus ook een duidelijke functie als evaluatie van het gedrag van de leerkracht.

Het spreekt vanzelf dat deze toetsen moeten voldoen aan strenge eisen van toetsconstructie. De doelstellingsvaliditeit is daarin een belangrijke factor. Daarom wordt bij iedere toetsvraag verwezen naar het nummer van de betrokken doelstelling en paragraaf. Voortgaande op de bedoeling van deze diagnostische toetsen is het ook logisch dat de leerling de resultaten zelf kan corrigeren. De antwoorden zijn in het *toetsenboekje* opgenomen.

Het grote belang van deze toetsen is dat de leerling zelf kan uitmaken welke doelstellingen en paragrafen hij opnieuw moet instuderen en welke hij voldoende beheerst. Een analyse van deze toets en een klassikale verbetering ervan door de leerkracht leggen meteen de zwakke plekken bloot en geven de leerkracht aanwijzingen voor een andere, nieuwe aanpak. De duidelijkheid, de structuur en de kennis van de resultaten, bovendien gezuiverd van selectiedruk, zorgen voor een rustige werksfeer, waarin de leerlingen zich gemotiveerder gedragen.

De *teksten in het tekstboek* zijn uiteraard per leereenheid gerangschikt.

De tekst van iedere leereenheid wordt voorafgegaan door een *wegwijzer* die bedoeld is als eerste kennismaking met de leereenheid. Hoewel de leerlingen de voorgestelde *wegwijzer* nog niet in alle consequenties verstaan, brengt dat toch een voorafgaandelijke

structurering van de te behandelen leerstof tot stand. Leerpsychologisch gezien is dit een belangrijk voordeel.

De tekst van een leereenheid is opgedeeld in paragrafen, die telkens een duidelijk afgeleid onderwerp behandelen. Iedere paragraaf draagt een samenvattende titel en wordt voorafgegaan door de *doelstelling(en)*. Overal waar er toepassingsmogelijkheden zijn, worden eerst *voorbeelden* gegeven waarbij opgeloste opdrachten voorgesteld worden. Pas daarna moeten de leerlingen zelf initiële *toepassingen* maken. Op dat ogenblik zijn de leerlingen klaar voor de diagnostische toets. De leerlingen die de basis voldoende beheersen, gaan over naar de *verrijksleerstof*, die in het tekstboek aangeduid is met een grijs raster in de marge. Zij lossen ook de *verrijksopdrachten* op die gerangschikt zijn in volgorde van moeilijkheidsgraad. Vanzelfsprekend gebeurt dit in de vorm van zelfstandig werk, eventueel in groepjes van twee of meer leerlingen. Tegelijk leren de leerlingen beter communiceren met elkaar en verwerven ze ook de nodige vaardigheden om binnen groepen zinvol te functioneren.

De leerlingen die de basis niet voldoende beheersen, herhalen de betrokken paragrafen, die rechtstreeks uit de nummering van de toetsvragen af te leiden zijn. Zij lossen ook de *herhalingstaken* op die door de leerkracht wenselijk worden geacht. De herhalings- en verrijksfase bieden de mogelijkheid te differentiëren naar tempo en, als de leerkracht dat wenst, naar verwerkingsmethode (groepjes, een dia, een leestekst, een schema, een gesprek met een vluggere leerling enz.). Elke leereenheid sluit af met een bondige synthese. Ze bevat de noodzakelijke elementen die bepalend zullen zijn voor het succesvol verwerken van de komende leerinhouden.

*Oplossingen* van toepassingen, herhalingstaken en verrijkingstaken zijn als los katern bij het tekstboek gevoegd. Als de leerkracht dat wenst, kunnen de leerlingen zelf de oplossingen raadplegen. Anders kan de leerkracht ze ter beschikking houden.

Er is voor de leerkracht ook een *handleiding* voorzien. Daarin worden de diagnostische toetsen opgenomen en wordt het onderwijskundige concept nader toegelicht en gemotiveerd. Ook de uitwerkingen van de vraagstukken zijn erin terug te vinden. Die handleiding, die alleen aan leerkrachten wordt verstrekt, heeft betrekking op zowel het deel gelijkstroommachines als op het deel wisselstroommachines.

Op het *inhoudelijke vlak* moet erop gewezen worden dat de behandeling van de leerstof uitgaat van het nu algemeen aanvaarde SI-eenhedenstelsel.

De gebruikers van dit gedifferentieerde leerpakket zullen wel begrijpen dat ook deze uitwerking nog niet honderd procent af is. We zien dan ook dankbaar alle suggesties ter verbetering tegemoet.

K. S.

# Algemene inleiding

In aansluiting op deel 3A (gelijkstroommachines), wordt in dit deel de theorie van de wisselstroommachines behandeld. De leereenheden zijn geordend volgens een logisch criterium, nl. de elektrische energieproductie en de distributie van deze energievorm.

In leereenheid 1 komt het genereren van wisselspanning (de *wisselstroomgenerator* of *synchrone generator* of *alternator*) aan bod.

Leereenheid 2 handelt over de *transformator*. De transformator is het logische verbindingsselement tussen de synchrone generator (productie) en het HS-verdeelnet (distributie) in centrales. Bovendien dient hij ook als verbindingsselement tussen het HS-verdeelnet en de distributie op laagspanning (verbruikers).

Het produceren en verdelen van elektrische energie heeft tot doel verbruikers te voeden. Dit brengt ons tot de leereenheden 3, 4, 5 en 6, waarin achtereenvolgens de *asynchrone motor*, de *synchrone motor*, de *speciale motoren* en *bijzondere toepassingen* behandeld worden. Technologische bijzonderheden die van groot nut lijken, zullen bij de bespreking van de onderscheiden machines toegelicht worden.

Enkel voor klasgebruik

**SP4**

Enkel voor klasgebruik.