



(12) **PATENT**

(19) **NO**

(11) **332673**

(13) **B1**

NORGE

(51) Int Cl.

H02K 3/28 (2006.01)

H02J 3/38 (2006.01)

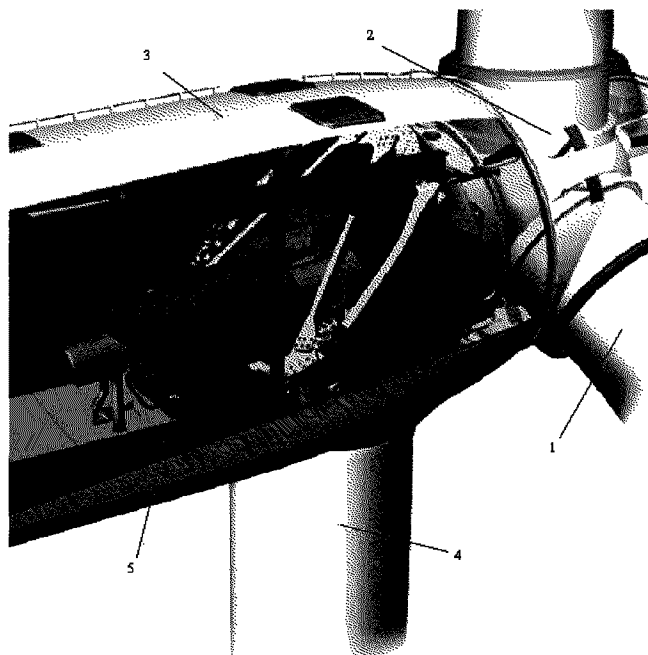
F03D 9/00 (2006.01)

Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20084921	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr
(22)	Inng.dag	2008.11.24	(85)	Videreføringsdag
(24)	Løpedag	2008.11.24	(30)	Prioritet
(41)	Alm.tilgj	2010.05.25		
(45)	Meddelt	2012.12.03		
(73)	Innehaver	Aker Engineering & Technology AS, Postboks 222, 1326 LYSAKER, Norge		
(72)	Oppfinner	Ole Johan Bjerknes, Ryghs vei 7 A, 0786 OSLO, Norge		
		Hallvard Breistein, Alfred Larsengate 5, 7031 TRONDHEIM, Norge		
(74)	Fullmektig	Protector Intellectual Property Consultants AS, Oscarsgate 20, 0352 OSLO, Norge		

(54)	Benevnelse	Frekvensomformer
(56)	Anførte publikasjoner	WO 00/60719 A1 US 6014323 A1 WO 84/03400 A1 ASEA BROVN BOVERY AB WO 99/29025 A1 US 2005/0012339 A1 WO 00/74198 A1 CN 101227153 A EP 1909371 A2 US 2006/0044857 A1 US 2008/0079400 A1 US 2006/0279249 A1 US 2004/0119292 A1 CN 1705211 A
(57)	Sammendrag	

Det er beskrevet et system for utjevning av kraft fra en turbin, hvilken turbin innbefatter minste et turbinblad (1) forbundet med et roterende nav (2), hvilket roterende nav (2) er anordnet til å drive en generator (5), kjennetegnet ved at generatoren er en flere pols synkron generator (5) forbundet via et mangfold galvanisk isolerte tre-fase kabler (11) til en flernivå frekvensomvandler (25), hvilke generator (5) er anordnet til å mate strøm til frekvensomvandleren (25) gjennom tre-fase kablene (11), hvilken flernivå frekvensomvandler (25) utgjøres av et mangfold elementer anordnet i kolonner og koblet i fallende rekkefølge for tilførsel av invertert spenning, en transformator (12) er forbundet med flernivå frekvensomvandleren (25) og er anordnet til å omdanne den tilførte inverterte spenningen til et strømnett (14) nivå forbundet med transformatorens (12) sekundærside. Det er også beskrevet en vindpark bestående av minst en selvstartende vindturbin og minst en ikke-selvstartende vindturbin, samt en fremgangsmåte for å starte minst en ikke-selvstartende vindturbin (21) med minst en selvstartende vindturbin (20) i en vindpark.



Frekvensomformer

Foreliggende oppfinnelses område

Denne foreliggende oppfinnelsen vedrører generelt en frekvensomformer forbundet med en turbin. Mer spesielt, vedrører denne foreliggende oppfinnelsen tilpasningen av kraft fra en variabel hastighetsturbin, for eksempel en vindturbin, koblet til en atskilt eksitert- eller permanentmagnetsynkronisert maskin.

Bakgrunn for foreliggende oppfinnelse og publisert viten

Etter hvert som fossile energikilder når deres toppproduksjon og deres tilgjengelighet faller, øker behovet for fornybar energi i takt med menneskehetens alltid økende forbruk. Lett tilgjengelige kilder av fornybar energi har, i stor grad, allerede blitt utviklet som med fossile kilder. Dette er sant, spesielt for vannkraft. Med andre ord, er det behov for nye fornybare energikilder, så som vind-, sol-, tidevann- eller bølgekraft. Et fellestrekk for disse energikildene er at de er iboende periodiske eller uforutsigbare, slik som tidevannstrømmer og kanskje solstråling, er kostbare å utvikle og iblant flyktige.

Av de fornybare energikildene nevnt ovenfor, har vindkraft så langt vist seg å være den mest potensielt konkurransedyktige. Den er, imidlertid, bebyrdet med store installasjonskostnader og lavt utbytte. Trenden er derfor mot høyere effekter for hver individuelle vindturbin, for å kunne maksimere produksjonen, og herav inntjeningene, fra innstallasjonen. Ettersom maksimum teoretisk kraft fra en vindturbin er proporsjonal med det sirkulære området dannet av dens vingetipper, så er kraften til en vindmølle proporsjonal med dens fysiske størrelse. Dette fører til strukturelle utfordringer som vedrører plassering av store og tunge komponenter på toppen av en høy struktur, som opplever formidabel drivkraft fra stive vinder. Mengden av tilgjengelig rom inni en vindmøllemotorcelle er også begrenset. Vindturbiner kan bli plassert på land eller til havs. Fokuset for forskning og utvikling har nylig dreiet mot vindturbiner til havs.

30

En annen utfordring som vedrører vindkraft er uforutsigbarheten forbundet med vindhastighet. De fleste vindturbiner med variabel hastighet som er alminnelige i dag har en forlangt vindhastighet på 2-4 m/s, en maksimum produksjonsvindhastighet på 12-16 m/s, og en utkoblingshastighet i området 25 m/s. Dette omfattende området for

driftsvilkår nødvendiggjør anvendelsen av en eller annen type krafttilpasningsenhet mellom kraftnettet og generatoren. Dette er, som er åpenbart for en fagperson, fordi en synkronisert generator koblet direkte til et kraftnett som opererer ved, for eksempel, 50 Hz bare ville være i stand til å rotere ved 3000, 1500, 1000, 750 rpm, osv. avhengig av dens konstruksjon – ref. figur 15 som også inkluderer noen andre frekvens- og hastighetsalternativer.

En vanlig måte for vindhastighetstilpasning for turbindrev er beskrevet i patentsøknad nr.: EP1908163A1, av selskapet Vestas Wind Systems. En frekvensomformer er anbragt mellom nettransformatoren og generatoren, med dens kontrollerte frekvensside ved generatorsiden. Denne løsningen muliggjør hastighetskontroll av maskinen i det som er kjent som regenerativ bremsing: vinden prøver å rotere generatorrotoren raskere enn hastigheten som tilsvarer den påførte kontrollerte frekvensen, og induserer strømmer som er matet gjennom omformerer og inn i nettet via en DC-link og en inverterer. Hvis kraftmomentet fra bladene blir for store for maskinen, kan omformerer øke frekvensen og derfor rotorhastigheten.

EP1416604A2 beskriver en elektrisk krets for en vindmølle. Denne elektriske kretsen inkluderer en drevet generator med rotor og stator. Statoren til generatoren er delt inn i atskilte deler, og hver del er koblet til uavhengige parallelle likeretterkretser og. Hver likeretterkrets er koblet til en uavhengig direkte strømkrets, som i sin tur er koblet til inngangen av minst en uavhengig inverterer. Til slutt, er utgangssignalene til de uavhengige invertererene koblet til et forsyningsnettverk. Seksjoneringen av statoren og de uavhengige likeretterene og invertererene fremskaffer et system med redundans, som gjør det mulig å utføre vedlikehold av den elektriske kretsen uten å måtte stenge ned hele driften av vindmøllen, og fremskaffer også større pålitelighet. En annen elektronisk kret for bruk ved vindmøller er beskrevet i WO00/060719.

Frekvensomformere er godt kjent for fagpersoner og de eksisterer i et antall varianter og topologier med forskjellige egenskaper, fordeler og ulemper. En slik frekvensomformer er den Siemens-patenterte "*Perfekt harmoniserie*" illustrert i figur 1. Den er karakterisert ved at den inneholder individuelle kraftceller 8 som inneholder en trefaselikeretter 6 og en enfase pulsbreddemodulert inverterer 7. Kraftcellene er deretter koblet i serie for å danne utgangssignalet fra en av de resulterende fasene som vist i figur 1. Hver kolonne av seriekoblede kraftceller 8 er 120° faseskiftet, og den

resulterende ganske glatte trefase AC driver en synkronisert- eller asynkronisert maskin
 9. Frekvensomformer 25 er matet fra en isolasjonstransformator 10 med en eller flere
 multipler med tre til fem bein. I tilfellet med figur 1, har den 12 trefase "lavspennings"-
 vindinger delt inn i fire grupper som består av individuelle trefasekoblinger til

5 diodelikeretterne med tre segregerte kraftceller. De 12 trefase "lavspennings"-
 vindingene vist i figur 1, har forskjellige faseskift for å kunne fremskaffe en "Ren
 inngangseffekt (Clean Power Input)"

Pulsbreddemoduleringen av kraftcellegruppene er typisk faseskiftet med noen grader
 for å kunne begrense harmonisk innhold på den resulterende kompositten for det
 10 trefasede utgangssignalet.

Et annet eksempel på en frekvensomformer er ABB's ACS 5000 som ble utviklet for å
 dekke behovene for det voksende antall applikasjoner drevet av standard motorer opp til
 6,9 kV. Denne typen av frekvensomformer er illustrert i figur 2 og omfatter en valgfritt
 15 integrert inngangstransformator 15 koblet til en hovedomformerdelen.

Hovedomformerdelen omfatter en diodelikeretter 6, en DC-linkkondensator 16 og en
 inverterer 7 koblet i serie og koblet til en motor. Motoren kan være en induksjons- eller
 en synkronisert motor med permanentmagneter eller feltviklinger. Invertereren 7 har
 spenningskildeinverterer flernivå-sikringsløs (voltage source inverter multilevel-
 20 fuseless, VSI-MF) topologien (9 nivåer linje-til-linje) og anvender den integrerte
 portkommuterte tyristor (integrated gate commutated thyristor, IGCT)
 halvlederteknologien. De typiske transformatorviklingene fase-skifter og diode-
 likerettere 6 vist i figur 2, legges alle sammen til å bli en 36-puls diodelikeretter som
 minimerer harmoniske trukket fra nettet. Kontroller 17 er også omfattet i ACS 5000.

25 Alstoms flernivåtype inverterer (Typisk ALSPA VDM6000) har "Flyvende
 kondensator" inverterertopologi som benytter en alminnelig mellomliggende dc-krets.
 Et høyere vanlig mellomliggende dc-spenningsnivå 26 blir oppnådd ved å tilsette dc-
 spenninger etter rektifisering som vist i figur 7. Spenningen er jevnet av en
 30 kondensatorbank og inverterte flertrinnsnivåer. VDM'en har kaskaderte IGBT-moduler
 med dioder i antiparallell for å sikre toveis kraftstrøm. CDM8000'en er en
 strømkildeinverterer i den samme familien. CDM'en benytter GTO'er eller IGCT'er.

Når elektrisk kraft er tvunget til å bli transportert over lange avstander og luftledninger er upraktiske, er direkte høyspenningsstrøm (High Voltage Direct Current, HVDC) et anvendelig alternativ. Figur 13 viser en DC-basert vindpark. Her, er det elektriske utgangssignalet fra hver turbin rektifisert umiddelbart etter den innledende

- 5 oppstegstransformatoren, samlet og ført til kysten i en alminnelig undervannskabel. Ved landkjenning (blir) kraften invertert inn i kraftnettet. Figur 14 viser et typisk skjematisk (bilde) av et HVDC-lys eller HVDC-plussystem. Det viser omformerstasjonen til havs lokalisert enten ved hver vindturbin eller virkende som et samlingspunkt for flere enheter, invertererstasjonen på land ved landfall og den sammenkoblende undervanns-
- 10 DC-kabelen.

Figur 16 viser en alternativ DC-basert vindparktopologi.

Det foregående har gitt en generell presentasjon av tre eksempler av flernivåinverterere. I det følgende, kan hvilken som helst type av passende flernivåinverterer bli anvendt.

15

Formål med foreliggende oppfinnelse

Det er et formål med foreliggende løsning å fremskaffe en løsning som kan hjelpe å tilfredsstille menneskehetens alltid økende kraftforbruk på en miljøvennlig måte. Det er også et formål for foreliggende oppfinnelse å fremskaffe en løsning på problemene med

20 hensyn til de store innstallasjonskostnadene og lave utbytte fra dagens vindturbiner, og også med hensyn til de strukturelle utfordringene som vedrører plassering av store og tunge komponenter på toppen av en høy struktur og den begrensede mengden av tilgjengelig plass inni en vindturbinmotorcelle.

- 25 Formålene med denne foreliggende oppfinnelsen blir oppnådd som beskrevet i de ledsagende kravene.

Kort sammendrag av foreliggende oppfinnelse

- Ifølge foreliggende oppfinnelse er det i et første aspekt fremskaffet et system for
- 30 tilpasning av kraft fra en turbin. Turbinen omfatter minst ett turbinblad koblet til et roterende nav. Det roterende navet er arrangert for å drive en generator.

Generatoren er en multipols synkronisert generator koblet via et mangfold av galvanisk isolerte trefasekabler til en flernivå frekvensomformer 25 eller alternativt til en liknende flernivå likerettertopologi for hvilken som helst dc-kraftsammenkoblinger med et

alminnelig mellomliggende dc-spenningsnivå 26 egnet til å kobles mot en omformer 7. Generatoren er innrettet til å tilføre strøm til frekvensomformer 25 gjennom trefasekablene. Flernivå frekvensomformer 25 er utgjort av et mangfold av elementer arrangert i kolonner og koblet i kaskaderekkefølge for å tilsette invertert spenning. En transformator er koblet til flernivå frekvensomformerutgangssignalet og arrangert for å transformere den tilsatte inverterte spenningen til et kraftnettnivå koblet til den sekundære transformatorsiden.

I en alternativ utførelsesform av systemet ifølge foreliggende oppfinnelse har generatoren rotorfeltviklinger eller permanentmagneter.

I enda en alternativ utførelsesform av systemet ifølge foreliggende oppfinnelse er systemet et girfritt system.

I en annen alternativ utførelsesform av systemet ifølge foreliggende oppfinnelse omfatter systemet et gir.

I en videre alternativ utførelsesform av systemet ifølge foreliggende oppfinnelse er statorviklingene til generatoren arrangert i en kombinasjon av D, Y og/eller Z-variasjoner.

I enda en videre alternativ utførelsesform av systemet ifølge foreliggende oppfinnelse er turbinen en vindturbin med variabel hastighet.

I en annen alternativ utførelsesform av systemet ifølge foreliggende oppfinnelse er transformatoren en standardtransformator eller en roterende transformator.

I et andre aspekt ifølge foreliggende oppfinnelse er det fremskaffet en vindpark omfattende minst en selvstartende vindturbin og minst en ikke-selvstartende vindturbin. Den selvstartende vindturbinen omfatter et system for tilpasning av kraft fra en vindturbin, der vindturbinen omfatter minst ett turbinblad koblet til et roterende nav. Det roterende navet er arrangert for drive en generator, og generatoren er en multipols synkronisert generator koblet via et mangfold av galvanisk isolerte trefasekabler til en flernivå kraftomformer. Generatoren er arrangert for å tilføre induisert strøm til

flernivåfrekvensomformerer gjennom trefasekablene. Flernivåfrekvensomformerer er utgjort av et mangfold av elementer arrangert i kolonner og koblet i kaskaderekkefølge for å tilsette invertert spenning. En transformator er koblet til flernivå

- frekvensomformerer og arrangert for å transformere den tilsatte inverterte spenningen
 5 til et kraftnettnivå koblet til transformatoren. Den minst ene selvstartende vindturbinen er arrangert for å starte den minst ene ikke-selvstartende vindturbinen ("wind turbines") ved å ha AC-siden mot kraftnettet.

- I alternativ utførelsesform av vindparken ifølge det andre aspektet ifølge foreliggende
 10 oppfinnelse har generatoren rotorfeltviklinger eller permanentmagneter.

I enda en alternativ utførelsesform av vindparken ifølge foreliggende oppfinnelse er den selvstartende vindturbinen girfri.

- 15 I enda en alternativ utførelsesform av vindparken ifølge foreliggende oppfinnelse omfatter den selvstartende vindturbinen et gir.

- I en videre alternativ utførelsesform av vindparken ifølge foreliggende oppfinnelse er statorviklingene til generatoren arrangert i en kombinasjon av D, Y. og/eller Z-
 20 variasjoner.

I enda en videre alternativ utførelsesform av vindparken ifølge foreliggende oppfinnelse er turbinen en vindturbin med variabel hastighet.

- 25 I en annen alternativ utførelsesform av vindparken ifølge foreliggende oppfinnelse er transformatoren en standardtransformator eller en roterende transformator.

- I et tredje aspekt ifølge foreliggende oppfinnelse er det fremskaffet en fremgangsmåte for å starte minst en ikke-selvstartende vindturbin med minst en selvstartende vindturbin
 30 i en vindpark ifølge det andre aspektet, der minst den ene selvstartende vindturbinen ("wind turbines") blir koblet til nødkraftenheter. Fremgangsmåten omfatter de følgende trinnene:

- vridning av minst ett blad på den minst ene selvstartende vindturbinen til en startposisjon ved å anvende nødkraftenheten,

- løsning av en brems på nevnte minst en selvstartende vindturbin for å rotere nevnte minst ett turbinblad,
- induksjon av spenninger i statoren i flernivå frekvensgeneratoren mens rotorhastigheten øker ved å anvende permanentmagnet- eller feltviklinger eksitert av
5 nødskraftenheten,
- starting av flernivåfrekvensomformerer og påtrykking av de induserte spenningene for å bygge en lokal nettspenning i vindparken,
- anvendelse av den lokale nettspenningen for å fremskaffe en spenning på minst en ikke-selvstartende vindturbin,
- 10 - vridning av nevnte minst ett blad på nevnte minst en ikke-selvstartende vindturbin til en startposisjon,
- løsning av nevnte minst en brems på den ikke-selvstartende vindturbinen for å rotere nevnte minst ett turbinblad.
- 15 I en alternativ utførelsesform av fremgangsmåten ifølge det tredje aspektet ifølge foreliggende oppfinnelse omfatter fremgangsmåten videre de følgende trinnene:
 - bygging av DC-linkspenninger til operasjonsnivåer i den selvstartende vindturbinen,
 - starting av flernivåfrekvensomformerer og påtrykking av DC-linkspenningene for å bygge en lokal nettspenning i vindparken,
 - 20 - bygging av DC-linksspenninger til operasjonsnivåer i den ikke-selvstartende vindturbinen.

I en alternativ fremtidig utførelsesform ifølge foreliggende oppfinnelse kunne energilagringsskapasiteten innen dc-linken(e) bli forbedret av energikompakte batterier
25 eller superkondensatorer og muliggjøre bedre øy-modusoperasjon av en enkelt eller noen vindturbiner, i tillegg til høyere toleranser versus transiente kraftnettbevisenheter.

Kort beskrivelse av tegningene

Foreliggende oppfinnelse vil nå bli beskrevet mer detaljert med referanser til de tilføyde
30 tegningene hvori:

Fig. 1 illustrerer en kjent kraftcelle og frekvensomformer.

Fig. 2 illustrerer et andre eksempel på kjent frekvensomformer.

- Fig. 3 illustrerer et eksempel på anvendelse ifølge foreliggende oppfinnelse i en vindturbin.
- Fig. 4 er et skjematisk bilde av systemet ifølge foreliggende oppfinnelse.
- Fig. 5a illustrerer en første alternativ utførelsesform av systemet ifølge foreliggende oppfinnelse hvor generatoren har 12 poler.
- Fig. 5b illustrerer den første alternative utførelsesformen av systemet hvor generatoren har 24 poler.
- Fig. 5c illustrerer den første alternative utførelsesformen av systemet hvor generatoren har 36 poler.
- Fig. 5d illustrerer den første alternative utførelsesformen av systemet hvor generatoren har 72 poler.
- Fig. 5e illustrerer den første alternative utførelsesformen av systemet hvor generatoren har 144 poler og parallelle Y-par av statorviklinger.
- Fig. 5f illustrerer den andre alternative utførelsesformen av systemet hvor generatoren har 144 poler og Y-Y seriekoblede par av statorviklinger.
- Fig. 5g illustrerer den tredje alternative utførelsesformen av systemet hvor generatoren har 144 poler og seriekoblede D-Y-par av statorviklinger.
- Fig. 5h illustrerer typisk statorviklingidentifisering for en alternativ utførelsesform av systemet hvor generatoren har 144 poler og parallelle Y-par.
- Fig. 6 illustrerer en andre alternativ utførelsesform av systemet (hvor generatoren har 12 poler) ifølge foreliggende oppfinnelse.
- Fig. 7 illustrerer en tredje alternativ utførelsesform av systemet (hvor generatoren har 12 poler) ifølge foreliggende oppfinnelse.
- Fig. 8 illustrerer en fjerde alternativ utførelsesform av systemet (hvor generatoren har 12 poler) ifølge foreliggende oppfinnelse.
- Fig. 9 illustrerer en vindpark omfattende en selvstartende og en ikke-selvstartende vindmølle.
- Fig. 10 illustrerer en femte alternativ utførelsesform av systemet egnet for hvilket som helst dc-grensesnitt, dvs. et grensesnitt til en passende inverterer eller et HVDC-system
- Fig. 11 illustrerer en sjette alternativ utførelsesform av systemet egnet for hvilket som helst dc-grensesnitt, dvs. et grensesnitt til en passende inverterer eller et HVDC-system

- Fig. 12 illustrerer en syvende alternativ utførelsesform av systemet egnet for hvilket som helst dc-grensesnitt, dvs. et grensesnitt til en passende inverterer eller et HVDC-system
- Fig. 13 illustrerer publisert viten *individual connection of wind turbines to a multi-terminal HVDC power system. ISBN 87-550-2745-8 Risø-R-1205(EN)*
- Fig. 14 illustrerer publisert viten HVDC-systemtopologi og informasjon av ABB
- Fig. 15 illustrerer i numerisk tabellform noen typiske relasjoner mellom generatorhastighet og frekvens versus rotorpol tall.
- Fig. 16 illustrerer publisert viten *individual connection of wind turbines to a HVDC power system.*
- Fig. 17 er et alternativt skjematisk bilde av systemet ifølge foreliggende oppfinnelse.

15 **Detaljert beskrivelse av foreliggende oppfinnelse**

Systemet er ment å bli koblet til en turbin, for eksempel en vindturbin. En typisk vindturbin er illustrert i figur 3 og omfatter minst ett turbinblad 1 koblet til et roterende nav 2. Navet er koblet til et turbinhus/en motorcelle 3 montert på toppen av et tårn, og motorcellen 3 roterer for å vende seg mot vinden ved hjelp av kontrollerte servomotorer.

Figur 4 viser et skjematisk bilde av systemet ifølge foreliggende oppfinnelse. Figuren 4 viser hovedkomponentene til systemet som omfatter turbinen 1, 2, 3, 4 med det roterende navet 2 som driver en multipols synkronisert generator 5 plassert i motorcellen 3.

- Generatoren 5 kan ha permanentmagneter eller rotorfeltviklinger. Multipols generatoren 5 har galvanisk isolerte statorviklinger tilsvarende antall rotorpoler og er derfor egnet for et frekvensomformergrensesnitt av en type som kan legge sammen spenningene fra forskjellige statorviklingsgrupper, som typisk vil være en flernivå frekvensomformer 25. En flernivå spenningskildeinverterer kunne gi spenninger i 6-7 kV-området eller høyere. Et strømkilde inverterergrensesnitt kunne også være egnet til å legge sammen spenningsnivåer fra segregerte statorviklinger av flerpols generatordrivverk. En transformator 12 er koblet til frekvensomformeren 25 via en AC-kabel. Denne transformatoren 12 kan kobles mot spenninger opp rundt 132 kV-området, og koble en vindmøllepark til det lokale kraftnettet. Statorsegmentene til den multipols

synkroniserte generatoren 5 er koblet til ulike nivåer av en flernivå frekvensomformer 25, som anvender disse nivåene til å legge sammen og bygge opp en høyere spenning.

Figur 5 og 6 viser to alternative utførelsesformer av systemet ifølge foreliggende

- 5 oppfinnelse. Forskjellen mellom de to alternative utførelsesformene er topologien til flernivå frekvensomformer 25, som igjen påvirker antallet poler på generatoren 5. Valget av halvleder er også forskjellig, der ACS 5000 er basert på IGBT'er og den perfekte harmonien på IGBT'er.
- 10 Som vist i figurer 5a og 5b, har den synkroniserte generatoren 5 galvanisk isolerte statorviklinger, og mater induisert strøm til en flernivå frekvensomformertopologi 25 gjennom galvanisk isolerte trefasekabler 11. For eksempel, dersom generatoren 5 er en 12-polsmaskin, mater seks sett av trefase generator-statorviklinger 13 seks galvanisk isolerte trefasekabler 11, som går fra generatoren 5 til flernivå frekvensomformer 25,
- 15 som vist i figur 5. Hver av disse trefasekablene 11 mater en kraftcelle 8 som genererer en fase AC. Kraftcellene 8 er arrangert i kolonner, og er koblet i kaskaderekkefølge for å tilsette en fase AC-spenningen. Som nevnt over, omfatter kraftcellene 8 en trefaselikeretter 6 og en en fase pulsbreddemodulert (pulse width modulated, PWM) inverterer 7. Kolonnene til kraftceller 8 er 120° faseskiftet av PWM-kontroll og er
- 20 koblet til en felles nulleleder. På denne måten, blir tre kolonner av en fase AC koblet sammen i en transformator eller til en AC-kabel for å produsere trefasekraft for transmisjon. En kraftnett grensesnitttransformator 14 er koblet til kraftcellene 8 for å kobles mot det lokale kraftnettet 12.
- 25 I den alternative utførelsesformen fremskaffet i figur 5a, har generatoren 12 poler, generatoren kan imidlertid ha et vilkårlig likt tall av poler p som tilsvarer $p / 2$ sett av trefaseviklinger, som hver mater en kraftcelle 8 gjennom en galvanisk isolert trefasekabel 11.
- 30 24 poler eller 12 polpar fremskaffer 12 separate trefase statorviklinger passende for en 9-nivå perfekt harmoni topologistruktur for 4160 volt AC-effekt, som vist i figur 5b, dvs. passende grensesnitt for en generator klassifisert for 250 rpm ved 50 Hz. Kraftnett grensesnittransformatoren 12 ville i dette tilfellet typisk være 22/4,2kV YNd eller Dyn.

36 poler eller 18 polpar gir 18 separate trefase statorviklinger passende for en 6600-7200 volt perfekt harmoni topologistruktur, som vist i figur 5c, dvs. passende grensesnitt for en generator klassifisert for 166,67 rpm ved 50 Hz eller 200 rpm ved 60 Hz.. Kraftnett grensesnittransformatoren 12 kunne i dette tilfellet typisk være 22/6,6kV YNd eller Dyn.

72 poler eller 36 polpar gir 36 separate trefase statorviklinger passende for en 11000-13800 volt perfekt harmoni topologistruktur, som vist i figur 5d , dvs. passende grensesnitt for en generator klassifisert for 83,3 rpm ved 50 Hz eller 100 rpm ved 60 Hz. Kraftnett grensesnittransformatoren 12 kunne i dette tilfellet typisk være 132/11kV YNd eller Dyn.

Merk at det foreliggende standardområdet ifølge utførelsesformen vist i figur 5a og 5b inkluderer spenninger opp til 13,8 kV, passende for å kobles mot et generatordrivverk med rundt 60-72 poler som bringer rotorhastigheten ned til 83,33 rpm ved 50 Hz, og dette er sannsynligvis ikke en teknisk grense.

144 poler eller 72 polpar gir 72 separate trefase statorviklinger som hvis sammenkoblet i par er passende for en 11000-13800 volt perfekt harmoni topologistruktur, som vist i figur 5e (kraftcelletopologi liknende det 72-polete drivverket i figur 5d), dvs. passende grensesnitt for en generator klassifisert for 41,7 rpm ved 50 Hz eller 50 rpm ved 60 Hz. En liknende generator kunne typisk være passende for variabel hastighetsoperasjon rundt 12 og 25 rpm i 15 til 30 Hz-området. Kraftnett grensesnittransformatoren 12 kunne i dette tilfellet typisk være 132/11kV YNd eller Dyn.

Det 144-polete vindturbindrivverket har blitt anvendt som et eksempel ("a typical") for å vise noen av de mulige sammenkoblingene for statorviklingsettene som kan passe forskjellige formål. Figur 5f viser Y-Y-seriekoblede par av statorviklinger som lett kan bli rearrangert til Z-konfigurasjoner uten å påvirke frekvensomformergrensesnittet. Figur 5f viser D-Y-serie koblede par av statorviklinger som også kan måle seg med et liknende frekvensomformergrensesnitt.

Videre viser Figur 5h typisk identifikasjonsnummerering av statorvikling for en del av et 144-polet vindturbindrivverk. De forskjellige statorviklingsettene til en 144-polet

generator kan bli identifisert som følger: U1 V1 W1, U2 V2 W2, U3 V3 W3,, U71 V71 W71, U72 V72 W72.

- U71 V71 W71 interagerer typisk med en rotormagnet med en nord- og en sørpol gjennom en gitt periode, og disse tre separate fasene kunne, hvis de har det samme faseskiftet, bli parallellkoblet ("be paralleled") med U72 V72 W72 som gjennom den samme perioden interagerer med en annen rotormagnet.

- Et vindturbindrivverk med 288 poler eller 144 polpar som gir 144 separate trefase statorviklinger som dersom sammenkoblet i grupper på fire er passende for en 11000-13800 volt perfekt harmoni topologistruktur, (kraftcelletopologi liknende de 72 og 144 polete drivverkene vist i figur 5d og 5e), dvs. passende grensesnitt for en generator klassifisert for 20,8 rpm ved 50 Hz eller 25 rpm ved 60 Hz. Kraftnett grensesnitttransformatoren 12 kunne i dette tilfellet typisk være 132/11kV YNd eller Dyn.
- Liknende ville en generator med 432 poler konstruert med grupper på 6 parallellkoblet og/eller seriekoblet 3-fase statorviklingssett som kan måle seg med det samme frekvensomformergrensesnittet som en 72-polet generator med 36 separate 3-fase statorviklingssett. En generator med 432 poler har ved 50 Hz 13.9 rpm, som kunne være passende for et stort vindturbindrivverk hvor den nominelle ratingen kunne bli referert til 22.2 rpm og 80 Hz, dvs. noe som skulle være vektbesparende for generatoren og den totale motorcelleinnstallasjonen.

- Figur 6 viser en annen alternativ utførelsesform av systemet ifølge foreliggende oppfinnelse. Som diskutert over, har en flerpolsgenerator 5 (12, 18, 24,..., 432-polet generator) bygget til å ha seks galvanisk segregerte statorviklingsgrupper med rotorsiden 18 koblet til det roterende navet 2 og statorsiden 19 koblet til kraftomformerens. Statorviklingsgrupper mater induisert strøm til en kraftomformertopologi gjennom galvanisk isolerte trefasekabler 11. Hver av disse trefasekablene 11 mater en kraftcelle 8 som genererer enfase AC. "Kraftcellen 8" i utførelsesformen som er vist forenklet i figur 6 omfatter en diodelikeretter 6, en DC-linkkondensator 16 og inverterer 7. "Kraftcellene 8" er arrangert i kolonner og koblet i kaskaderekkefølge for å tilføre spenningen. Disse tilførte spenningene fremskaffer både redundans, som beskrevet av leverandørene, og en høyere utgangsspenning, som innebærer høyere strømmer og økt effektivitet i hele systemet.

En 12-puls eller høyere rektifiseringstopologi har fordeler siden anvendelsen av en diodebrolikeretter vil forårsake harmonisk på bølgeformen til statorstrømmen.

Statorviklingene kan bli arrangert i en kombinasjon av D, Y og forskjellige andre viklingskoblinger. For en 12-pols generator kunne det typisk være 3 av delta og 3 av stjerne-koblede statorviklinger dersom nødvendig for å forenkle 12-pulsrektifisering og derfor begrense de magnetiske feltene til det høyere harmoniske, dvs. begrense virvelstrømtapene i rotoren og redusere faren for avmagnetisering av permanentmagnetene ved en relativt liten belastning dersom rotordesignet ikke inkluderer "dempeviklinger" av noe slag.

For en permanentmagnetgenerator ville verdien av DC-linkspenningen normalt være direkte relatert til akselhastigheten, med mindre en kontrollert likeretter er anvendt. Kontrollerte likerettere kan kontrollere statorstrømmen til å være sinusformet og påvirke amplituden til utgangsspenningen til generatoren med tilbakevirkende kraftkontroll for å avpasse nettspenningen delvis uavhengig av akselhastigheten, dvs. vindturbinhastigheten.

Som for figur 5a, den alternative utførelsesformen gitt i figur 6, har generatoren 12 poler, generatoren kan imidlertid ha et vilkårlig partall av poler p tilsvarende $p / 2$ sett av trefaseviklinger, som hver mater en kraftcelle 8 gjennom en galvanisk isolert trefasekabel 11.

En praktisk begrensning i poltall for utførelsesformene vist i både figur 5 og 6, kunne for et vindturbingenerator drivverk være i området 200 til 400 poler, dvs. opp til tilnærmet 200 polpar for veldig store vindturbindrivverk, siden 200 polpar og 15 rpm gir 50 Hz utgangssignal fra generatoren, som resulterer i tilnærmet 94 m/s vingetipphastighet for 60 m turbinblader. På den annen side ville høyere poltall kombinert med liknende hastigheter gi en høyere utgangsfrekvens fra generatoren som kunne redusere generatorvekt og -størrelse.

Konvensjonelle vindturbiner har en girkasse plassert i motorcellen 3. En vindturbin som omfatter systemet ifølge foreliggende oppfinnelse kan imidlertid operere uten en girkasse. Dette reduserer vekten til motorcellen 3 og fjerner en komponent som med

tendens til slitasje og korrosjon. Dersom et vindturbingenerator drivverk 5 klassifisert i MW-området skulle operere uten en girkasse så ville det være fordelaktig å velge en generator 5 med 24 til 30 poler eller mer. For et 5 MW vindturbindrivverk uten en girkasse er det antatt at en generator 5 med rundt 50-70 polpar kunne være

- 5 konkurrerende i forening med en frekvensomformer 25. Hvis denne polymengden skulle vise seg å være upraktisk, kunne den oppfinnsomme løsningen bli kombinert med publisert viten ved å introdusere et ettrinns planetarisk gir. Den resulterende løsningen er fortsatt langt mer robust, lettere og krever mindre vedlikehold enn for eksempel Vestas-løsningen for deres 3 MW V90 mill, som har tretrinns planetarisk gir og ettrinns
- 10 spiralformet ("helical").

En 48-pols generator 5 hvor statorviklingene er sammenkoblet i grupper på 4 kan anvende den samme variable frekvens drivverktopologien som en 12-pols synkronisert generator 5.

- 15 På liknende måte kan en 144-pols generator 5 hvor statorviklingene er sammenkoblet i grupper på 4 anvende den samme variable frekvens drivverktopologien som en 36-pols synkronisert generator 5.

- På liknende måte kan en 144-pols generator 5 hvor statorviklingene er sammenkoblet i grupper på 2 anvende den samme variable frekvens drivverktopologien som en 72-pols
- 20 synkronisert generator 5, som vist i figur 5e. Vennligst merk at to trefase Y eller Z parallellkoblede statorviklinger er passende for direkte vannkjøling gjennom deres to nøytrale stjernepunkter.

- Med systemet ifølge foreliggende oppfinnelse, kunne en typisk flerpols
- 25 generatorutgangsspenning rundt området 400-2000 V deretter legges sammen i en frekvensomformer 25 til en effekt rundt området 4-13 kV eller høyere og da muliggjøre en videre ettrinns transformatorinnstallasjoner med standard viklingsratioer til spenningsnivåer rundt 22-132 kV.

- 30 Figurer 7 og 8 viser en tredje og fjerde utførelsesform ifølge foreliggende oppfinnelse ved å anvende flernivå invertererene vdm og cdm fra Alstom. Figur 7 viser foreliggende oppfinnelse med vdm flernivåinvertereren og figur 8 viser cdm flernivåinvertereren.

I konvensjonelle vindturbiner, er en transformator plassert i bakenden av motorcellen 3, som ikke vil være nødvendig med et system ifølge foreliggende oppfinnelse. Dette “transformatorrommet” kunne bli anvendt av en frekvensomformerinnstallasjon, ifølge foreliggende oppfinnelse, istedet avpasset å kobles mot en flerpols generator

- 5 fortrinnsvis uten en girkasse. I tillegg, kan transformatoren plassert før de valgfrie sleperingene i en vindturbin bli eliminert ved å anvende systemet ifølge foreliggende oppfinnelse. Ved å ha et gir-fritt system, vil mengden vedlikehold bli mindre. Ved hvilken som helst hastighet, blir spenningen fremskaffet av den oppfinnsomme løsningen høy nok til å flytte den første oppstegstransformatoren nærmere ned mot
- 10 bakken eller havflaten med eller uten en ac-kraftsvivel. Dette er en hovedfordel med det oppfinnsomme drivhjulverket.

- Kravene for rom- og vektene for motorcellen 3, kunne bli redusert videre ved å legge sammen dc-spenningene fra likeretterene koblet til hver av 3-fasestatorviklingen, for å
- 15 kunne bygge opp et dc-spenningsnivå passende for å bli overført gjennom en dc-kraftsvivel hvis nødvendig til en inverterer plassert et eller annet sted videre nede i tårnstrukturen eller mer fjerntliggende. Denne tilnærmingen kunne også bli anvendt for å direkte kobles mot et flerterminalt HVDC-system, spesielt hvis flerpols (“multipold”) generatorer basert på Powerformer-teknologi er inkludert i systemdesignet. En halvdel
- 20 av turbindrivverkene i en park kunne deretter, hvis ønskelig, bli koblet mellom “+” og “0” med den andre halvdelen av turbindrivverkene koblet mellom “-” og “0”, for å kunne danne et bipolart dc-kraft systemgrensesnitt.

- Figur 10 viser en utførelsesform ifølge foreliggende oppfinnelse hvor strømmene fra hvert statorviklingssett er rektifisert av en serie koblet (typisk seks puls) likeretterbroer
- 25 med en mølle koblet mellom “+” og “0”.

Figur 11 viser en utførelsesform ifølge foreliggende oppfinnelse hvor noen statorviklingssett er parallellkoblet for å kunne avpasse strømkapasiteten til hver halvledermodul i et bipolart dc-kraft systemgrensesnitt.

- Figur 12 viser en utførelsesform ifølge foreliggende oppfinnelse hvor noen likerettere er
- 30 parallellkoblet for å kunne tøyse strømlastingen til hver halvledermodul. Videre, kunne utførelsesformen illustrert i figur 10, 11 og 12 forenkle dc-serie eller parallellkobling av vindturbindrivverk. En slik vindpark er illustrert i figur 13 eller 16.

En mer skjematisk oversikt av en flerpols synkronisert generator som kobles mot et alminnelig mellomliggende dc-spenningsnivå 26 er vist i figur 17.

- Som kjent for en fagperson, er det i dag et problem med vindparker at de er avhengig av et eksisterende kraftnett for å kunne starte. Dette er fordi konvensjonelle vindmøller, av forskjellige typer, ofte blir kjørt i det som blir kalt regenerativt bremsemodus. I regenerativt bremsemodus er en fullbro koblingseffektforsyning plassert mellom nettet og generatoren med dens kontrollerte frekvensside vendt mot generatoren. I det vinden beveger turbinbladene, generatoren og roterer med en hastighet tilsvarende frekvensutgangssignalet til koblingseffektforsyningen. Når bladene er vridd for å kunne produsere ekstra kraftmoment, akselererer turbinbladene generatoren og koblingseffektforsyningen bremser generatoren. Bremseenergien blir overført via fullbro koblingseffektforsyningen hvor den blir rektifisert og matet til nettet gjennom en enkel ukontrollert inverterer. Det er da åpenbart for fagpersoner at dersom kraftnettet er nede, er det ingen dc-link mellom nettet og koblingseffektforsyningen, derfor kan det ikke være noen kontrollert frekvens AC-side til å bremse generatoren elektrisk. Turbinen vil ruse eller, fortrinnsvis, bli bragt til en kontrollert stopp ved vridning av bladene og anvendelse av en mekanisk brems.
- Dersom, imidlertid, en eller flere av vindmøllene i parken er av typen ifølge foreliggende oppfinnelse, kan den følgende prosedyren bli anvendt til å dødnettstarte vindparken som omfatter flere konvensjonelle vindmøller. Dødnettstarten av en konvensjonell vindmølle vil variere, avhengig av designet til vindmøllen. Uansett design, behøver alle konvensjonelle vindmøller et lokalt kraftnett med spenning for å kunne starte. Årsaken til behovet for dette nettet varierer, avhengig av vindmølledesignet. De konvensjonelle, ikke-selvstartende vindturbinene 21 anvender, på en vilkårlig måte, den lokale nettspenningen fremskaffet av de selvstartende vindturbinene 20 ifølge foreliggende oppfinnelse. Figur 9 viser et enkelt tilfelle av en vindpark omfattende to vindmøller 20, 21. Den illustrerer forskjellen mellom det lokale kraftnettet og det lokale kraftnettet. En lokal belastning 23 er lokalisert på vindmøllesiden av transformatoren 22, og en kretsbyrter 24 er lokalisert på nettsiden av transformatoren 22. Vindmøllen ifølge foreliggende oppfinnelse, omfattende en koblingseffektforsyning med dens kontrollerte AC-side som vender mot nettet, kan starte ved å fjerne mekaniske bremses og kontroll av bladvridning med UPS (uavbrutt

kraftforsyning, Uninterruptible Power Supply) nødkraft. Ved det tilfellet at møllen omfatter en eksternt eksitert synkronisert generator, kan denne også bli gjort strømførende av UPS-nødkraft. Ettersom turbinen, og derfor generatoren, øker hastighet, blir spenning indusert for å mate koblingseffektforsyningen. Denne

5 frekvensomformerer 25 kan da bygge et svakt, men tilstrekkelig lokalnett ved den isolerte vindparken. Ettersom spenningen fra vindmøllen ifølge foreliggende oppfinnelse bygger, kan konvensjonelle vindmøller bli startet en om gangen. Disse konvensjonelle vindmøllene vil da bidra til det lokale nettet etter å ha blitt startet. Under denne dødnettstarten, ville en lokal belastning eller en motstandsbank /

10 elektrodekjel være nødvendig for å kunne dumpe overskudd kraft og levere det nødvendige bremsekraftmomentet for de selvstartende vindmøllene når vridningskontrollen er utilstrekkelig.

Frekvensomformersystemet kan bli utstyrt med en spenningsbegrenserenhet(er) eller

15 automatisk bremsebryter(e) som passende for de forskjellige topologistrukturere. Disse automatiske dc-bremsebryter(ene) kan spre den aktive kraften fra turbinen under forskjellige nettfeil hvis installert.

Summert opp, forenkler systemet ifølge foreliggende oppfinnelse store flerpols

20 generatorer i vindturbiner, for å kunne øke kraften på vindturbinen og redusere rotasjonshastigheten uten, eller minimering av anvendelsen av, girtransmisjoner. Foreliggende oppfinnelse anvender en flerpols synkronisert generator 5 karakterisert ved at dens statorviklinger er isolert fra hverandre, sammen med en frekvensomformertopologi som øker utgangsspenning ved å legge sammen spenninger

25 fra de galvanisk isolerte statorviklingene. Krafttransformatoren som vanligvis er lokalisert i motorcellen 3 kan derfor bli ignorert, noe som frigjør både plass og vekt og derfor forenkler den store flerpols generatoren som er nødvendig i en direkte drevet vindturbin eller vindmølle. Foreliggende oppfinnelse kan bli anvendt i flere turbintyper, for eksempel vindturbiner, tidevannsgeneratorer osv.

Referansetallord

1. Turbinblad
2. Roterende nav
- 5 3. Motorcelle
4. Tårn
5. Generator
6. Likeretter / Omformer
7. Inverterer / Omformer
- 10 8. Kraftcelle
9. Synkronisert- eller asynkronisert maskin
10. Isolasjonstransformator
11. Galvanisk isolerte trefasekabler
12. Kraftnett grensesnitttransformator
- 15 13. Trefase generatorviklinger
14. Kraftnett
15. Inngangstransformator
16. Kondensator
17. Kontroll
- 20 18. Rotor
19. Stator
20. Selvstartende vindmølle
21. Ikke-selvstartende vindmølle
22. Transformator
- 25 23. Lokal belastning
24. Kretsbyter
25. Frekvensomformer
26. Mellomliggende dc-spenningsnivå
- M. Motor

K r a v

1. Et system for tilpasning av kraft fra en gir-løs turbin innrettet for variabel hastighet, der turbinen omfatter minst ett turbinblad (1) kobler til et roterende nav (2), der det roterende navet er innrettet til å drive en generator (5),

k a r a k t e r i s e r t v e d a t

- generatoren er en multipol synkronisert generator (5) koblet med et flertall av galvanisk isolerte trefasekabler (11) til en flernivå frekvensomformer (25),
- der generatoren (5) er innrettet til å levere strøm til frekvensomformer (25) gjennom trefasekablene (11),
- der multnivå frekvensomformer (25) utgjøres av et flertall elementer arrangert i kolonner og koblet i kaskaderekkefølge for å tilføre invertert spenning,
- en transformator (12) er koblet til multnivå frekvensomformer (25) og innrettet til å transformere den tilførte inverterte spenningen til et kraftgrid(nett)-nivå (14) koblet til transformatorens sekundære side (12)
- hvori generatoren (5) er en multipol synkronisert generator (5) med minst 12 poler koblet via nevnte flertall galvanisk isolerte trefase-kabler (11) til en flernivå likeretter topologi (6,7,16,26), omfattende en omformer/inverter (7), egnet for tilkobling til et kraftnett via transformatoren.

2 System ifølge krav 1, der generatoren (5) har rotorfeltviklinger eller permanentmagneter.

3. System ifølge krav 1 der statorviklingene (5) er arrangert i en kombinasjon av D, Y og Z-variasjoner.

4. System ifølge krav 1, der variabel hastighet turbinen er en vindturbin.

5. System ifølge krav 1, der transformatoren (12) er en standardtransformator eller en roterende transformator.

6. System ifølge krav 1, der generatoren er en multipols synkronisert generator (5) koblet via nevnte flertall galvanisk isolerte trefasekabler (11) til en flernivå likeretter-topologi (6) som mater et felles mellomliggende DC-spenningsnivå (16,26) egnet til kobling mot en eksternt plasserte inverteren (7) på en flernivå frekvensomformer (25).

7. System ifølge krav 1, der generatoren er en multipol synkronisert generator (5) koblet via nevnte flertall isolerte trefasekabler til en flernivå likeretter (6) topologi som mater et felles mellomliggende DC-spenningsnivå (16,26) egnet til å kobles til en fjernt plassert inverter (7).

8. Bruk av et variabel hastighet, gir-løs turbin system ifølge krav 1 i en vindpark, der variabel hastighet turbinen er en selvstartende vindturbin, hvori den selvstartende vindturbinen omfatter et system for tilpassning av kraften fra en vindturbin, der vindturbinen omfatter minst ett turbinblad (1) koblet til et roterende nav (2), der den roterende navet er innrettet til å drive en generator (5), der generatoren er en flerpols synkronisert generator (5) omfattende minst 12 poler koblet via en serie med galvanisk isolerte trefasekabler (11) til en flernivå frekvensomformer (25), der generatoren er innrettet til å mate induisert strøm via en flernivå frekvensomformer (25) gjennom trefasekablene (11), der flernivå frekvensomformeren (25) utgjøres av et flertall elementer arrangert i kolonner og koblet i kaskaderekkefølge or å påtrykke invertert spenning, en transformator (12) er koblet til flernivå frekvensomformeren (25) og innrettet til å transformere den påtrykte inverterte spenningen til et kraftnett (14) jevnt koblet til transformatoren (12), der generatoren (5) er en multipol synkronisert generator (5) med minst 12 poler koblet via nevnte flertall galvanisk isolerte trefase-kabler (11) til en flernivå likeretter topologi (6,7,16,26), omfattende en omformer/inverter (7), egnet for tilkobling til et kraftnett via transformatoren, og der nevnte minst en selvstartende vindturbin er innrettet til å starte nevnte minst en ikke-selvstartende vindturbin ved å la AC-siden mot kraftnettet (14).

2/20

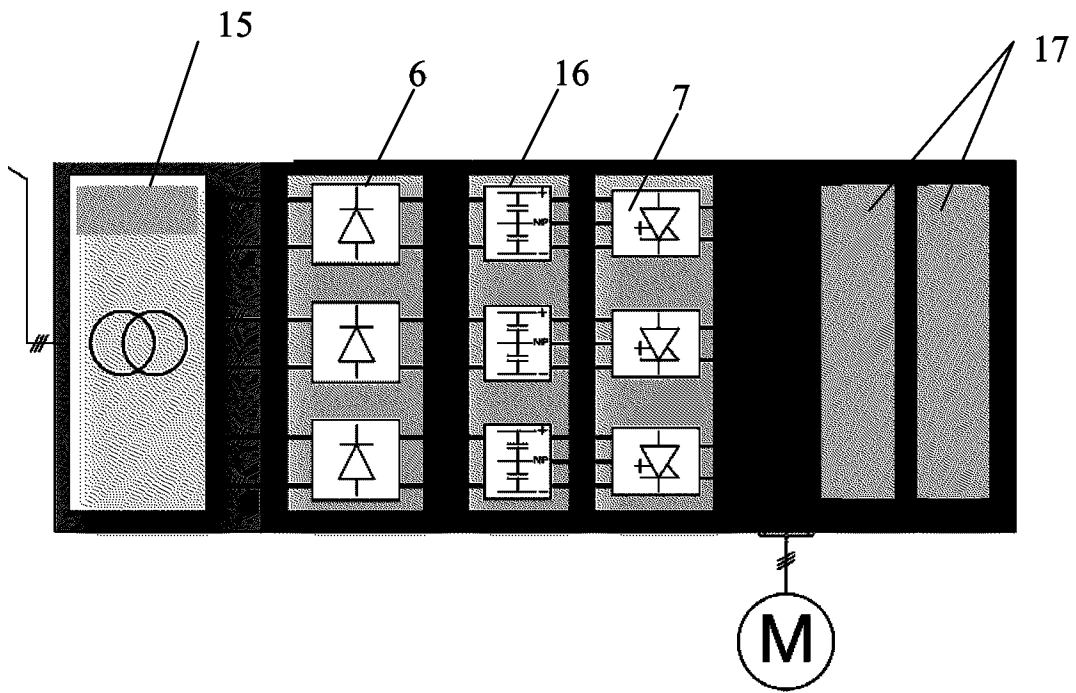


Fig. 2

3/20

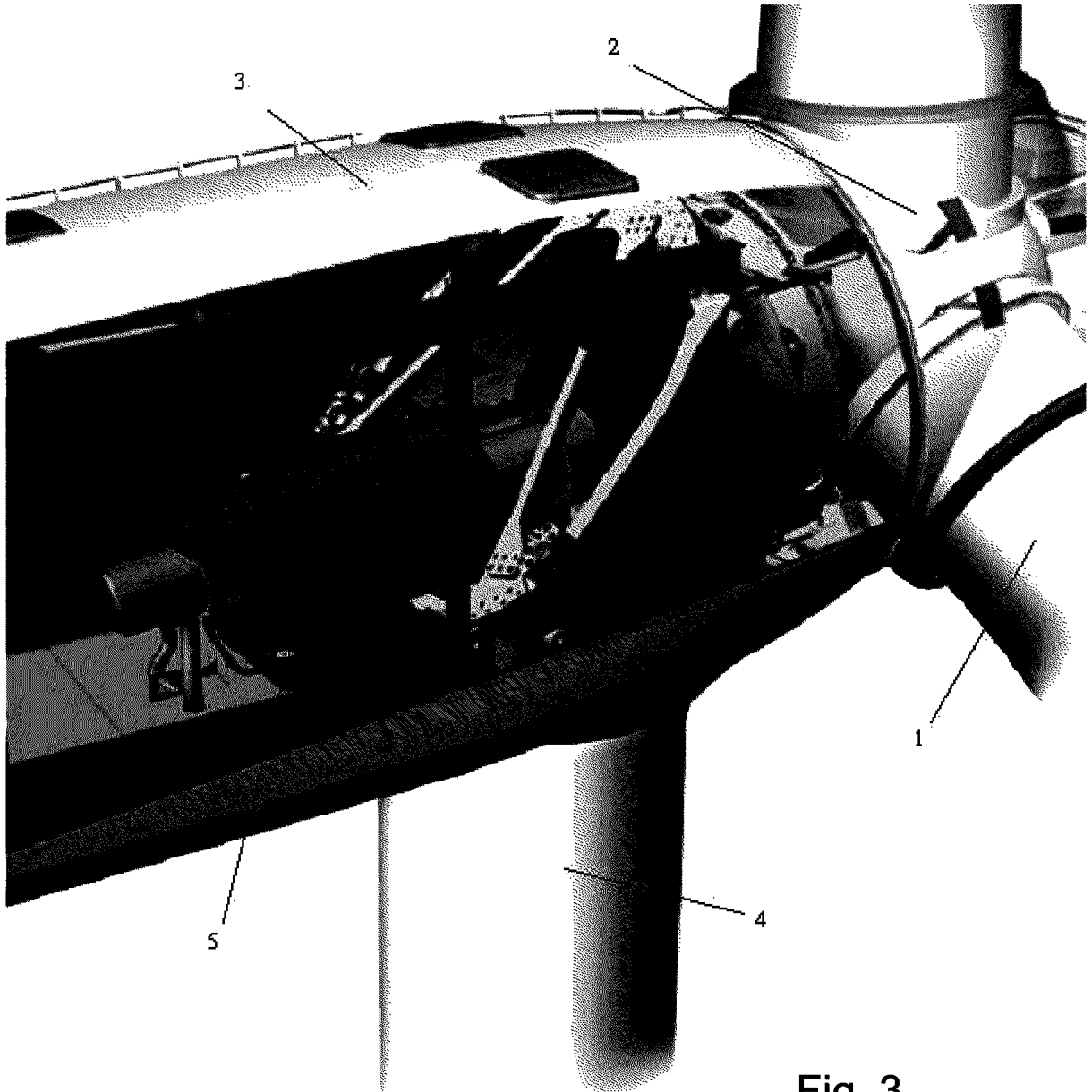


Fig. 3

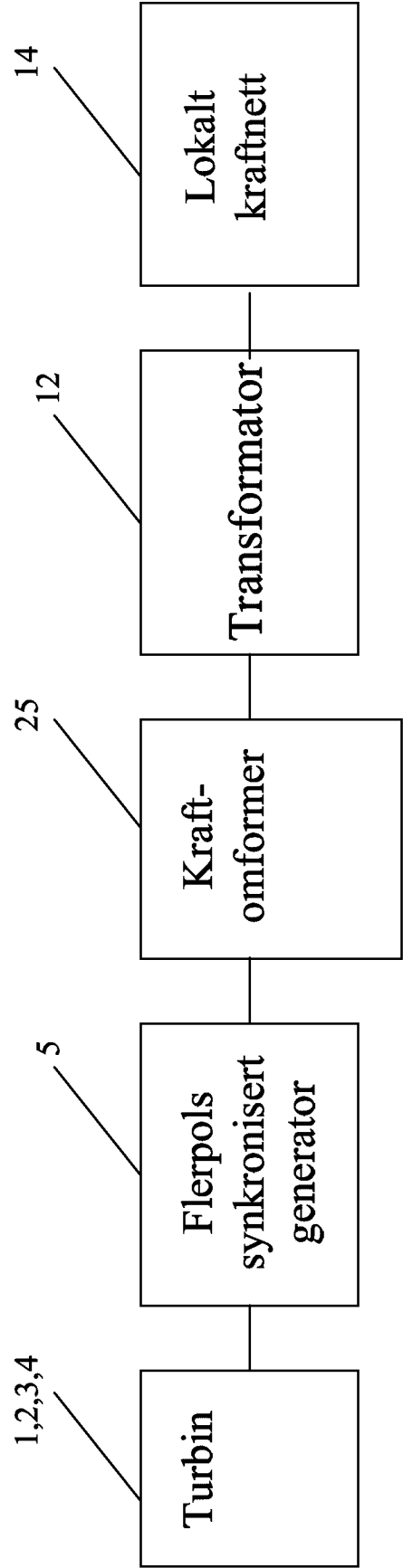


Fig. 4

5/20

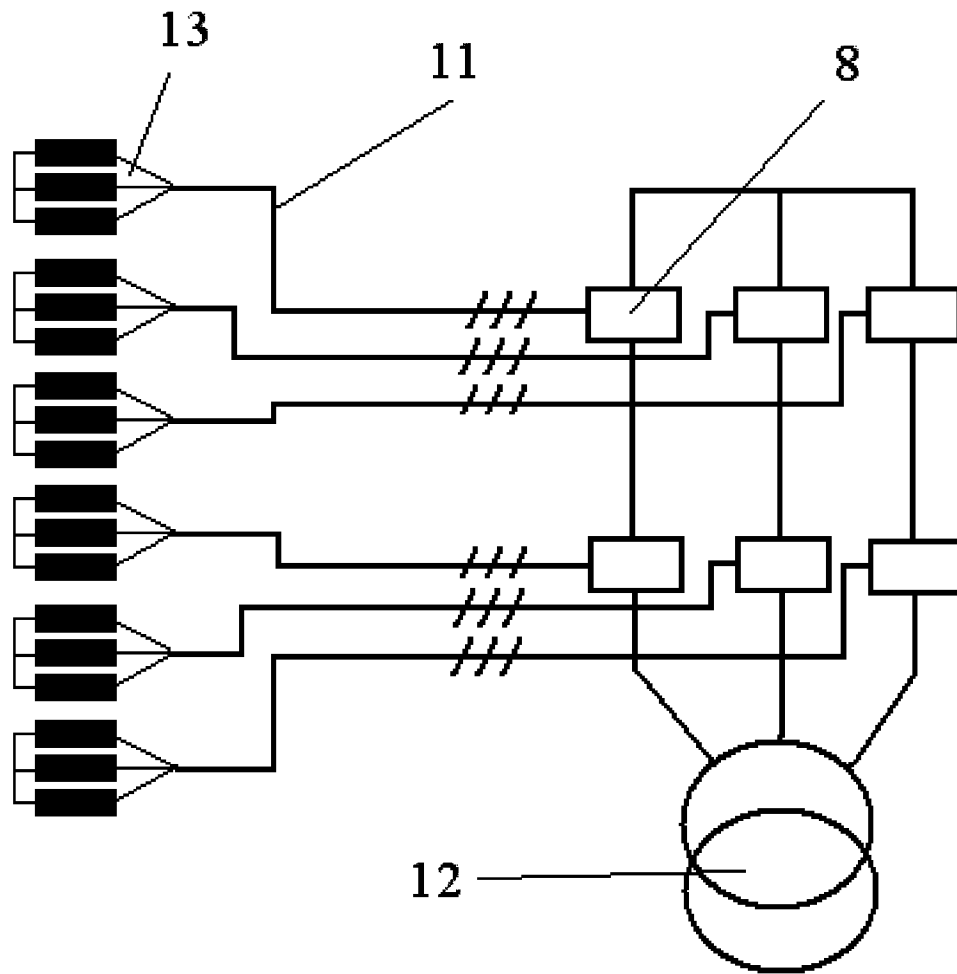


Fig. 5a

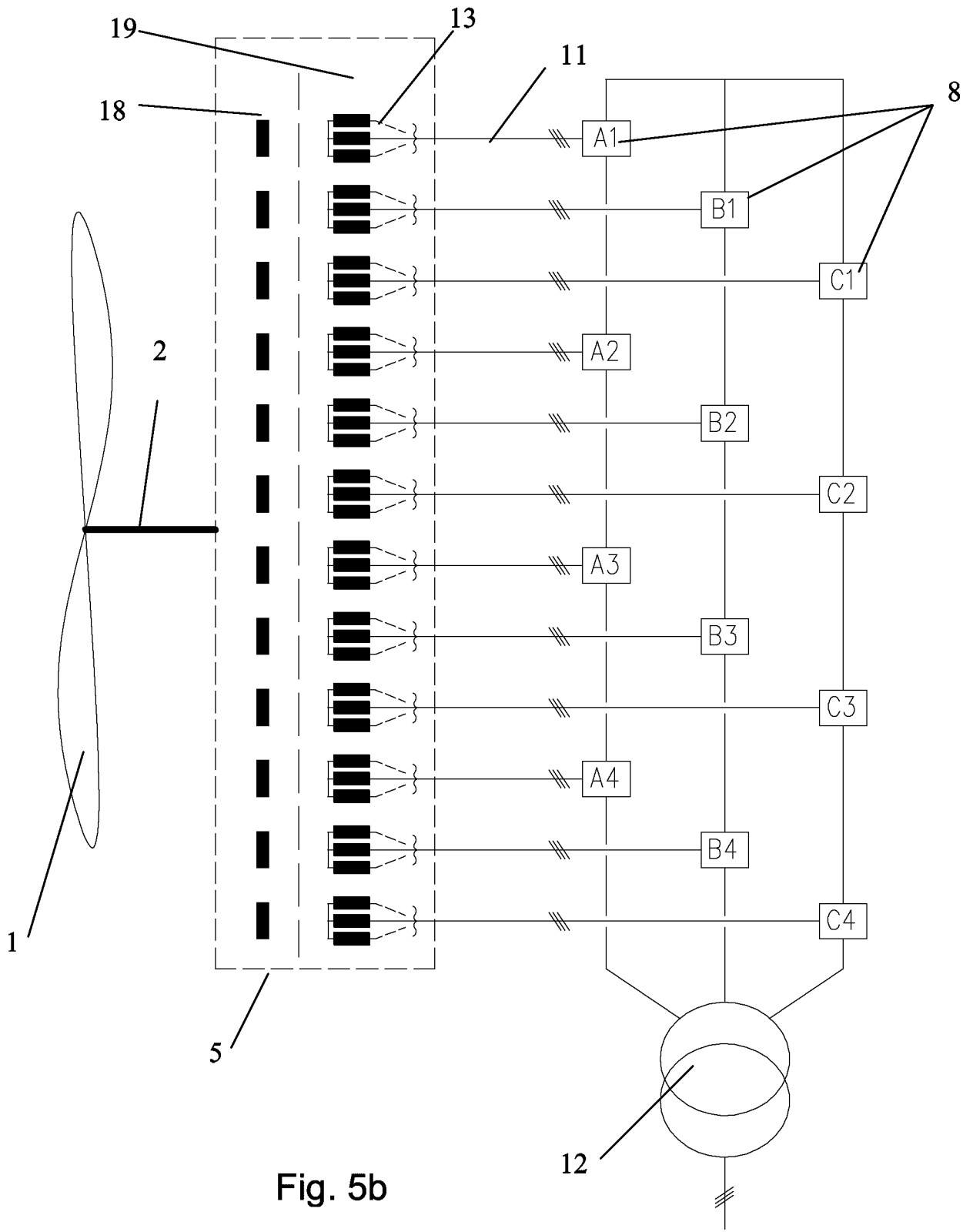


Fig. 5b

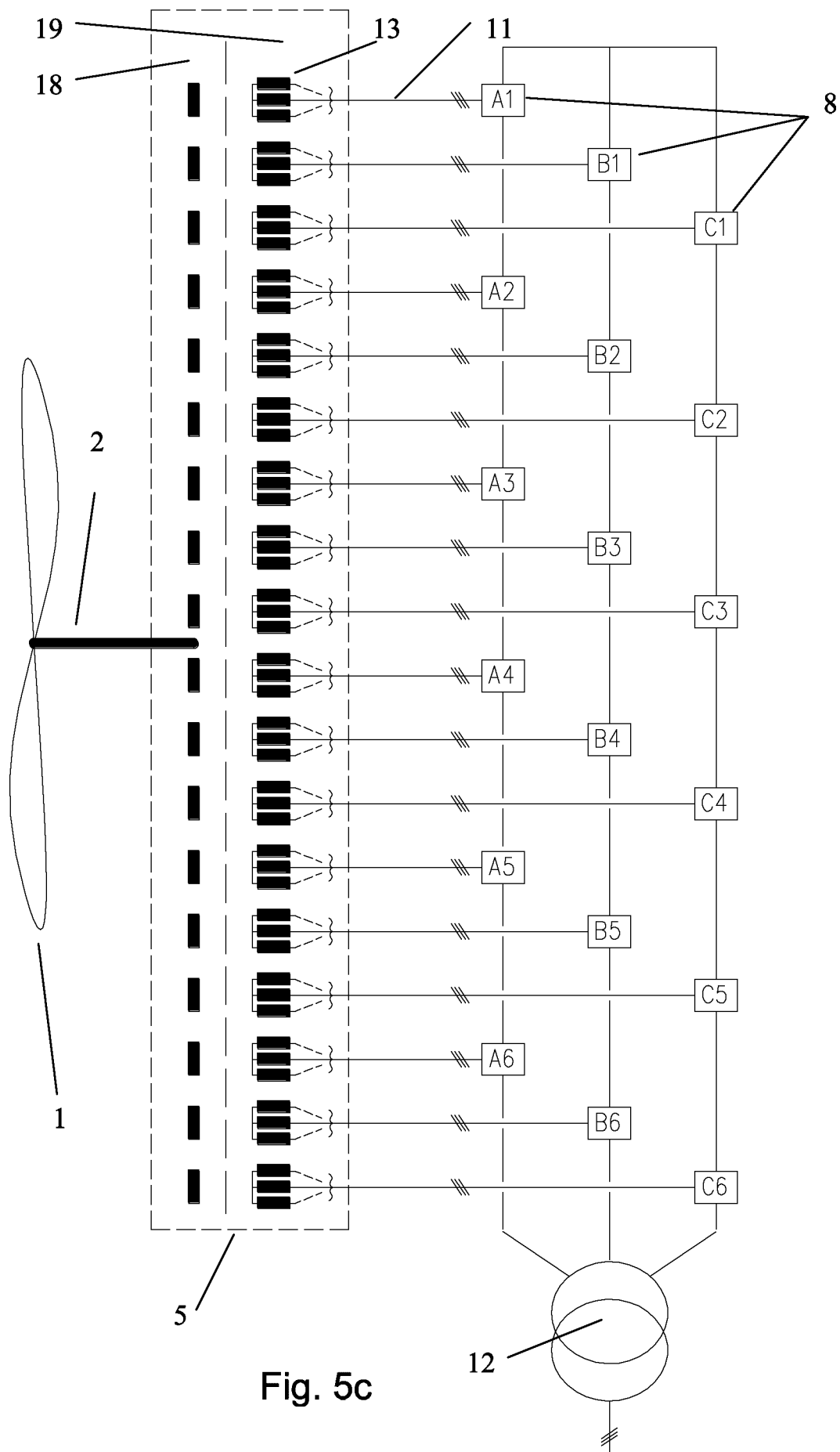
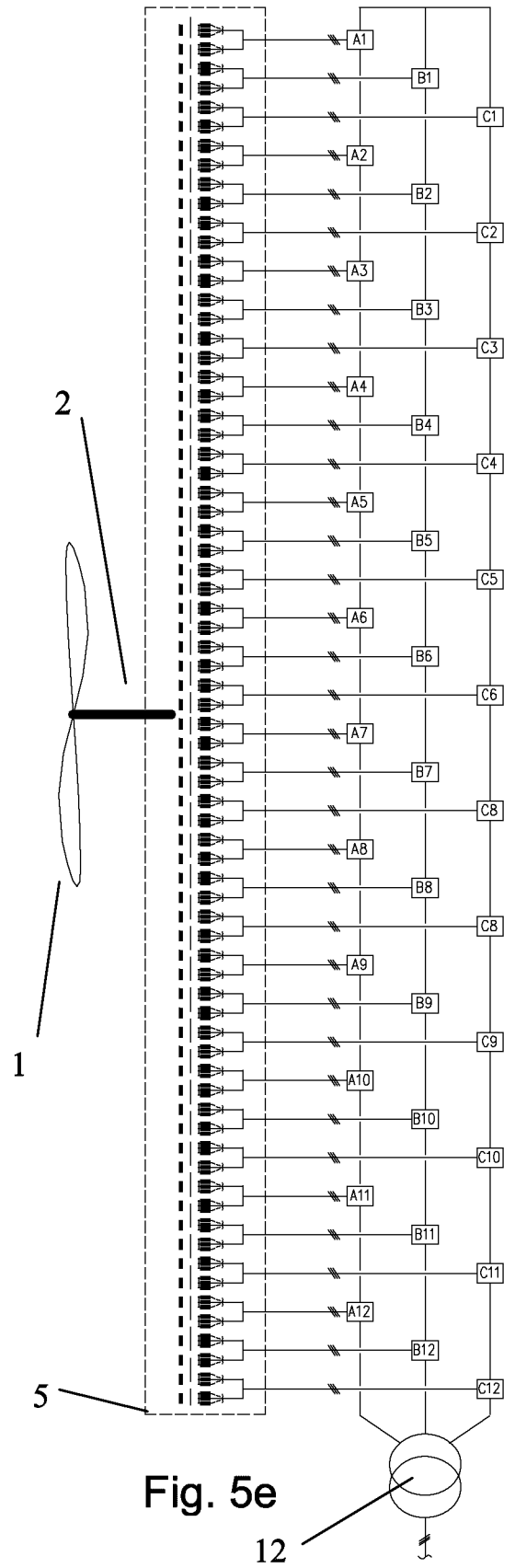
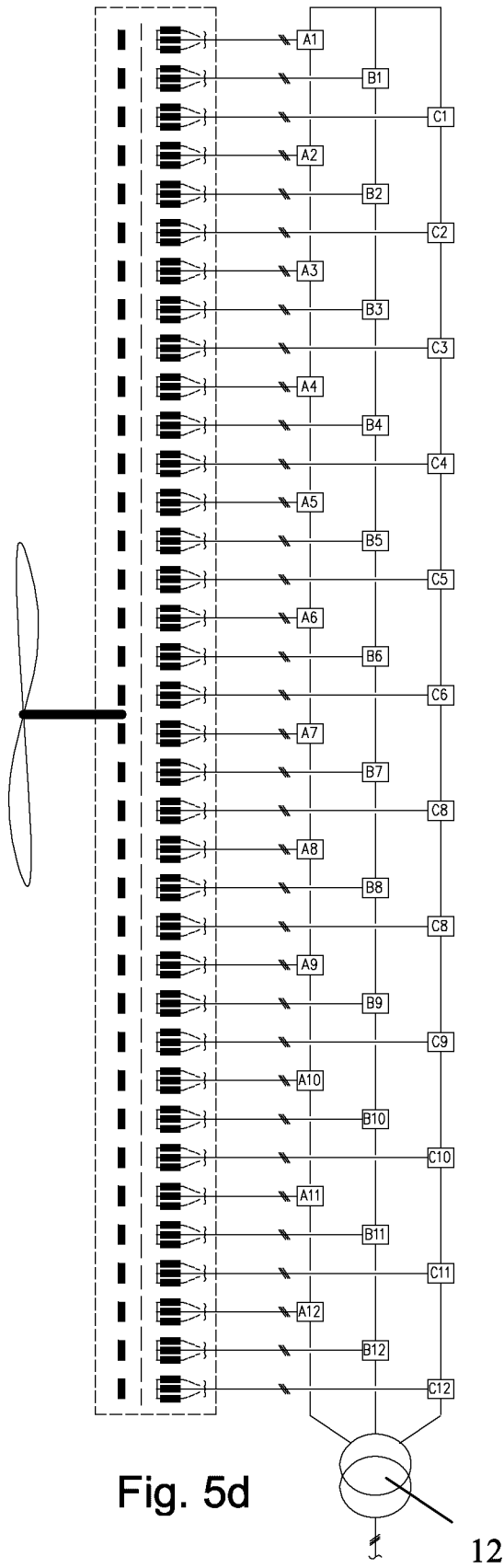
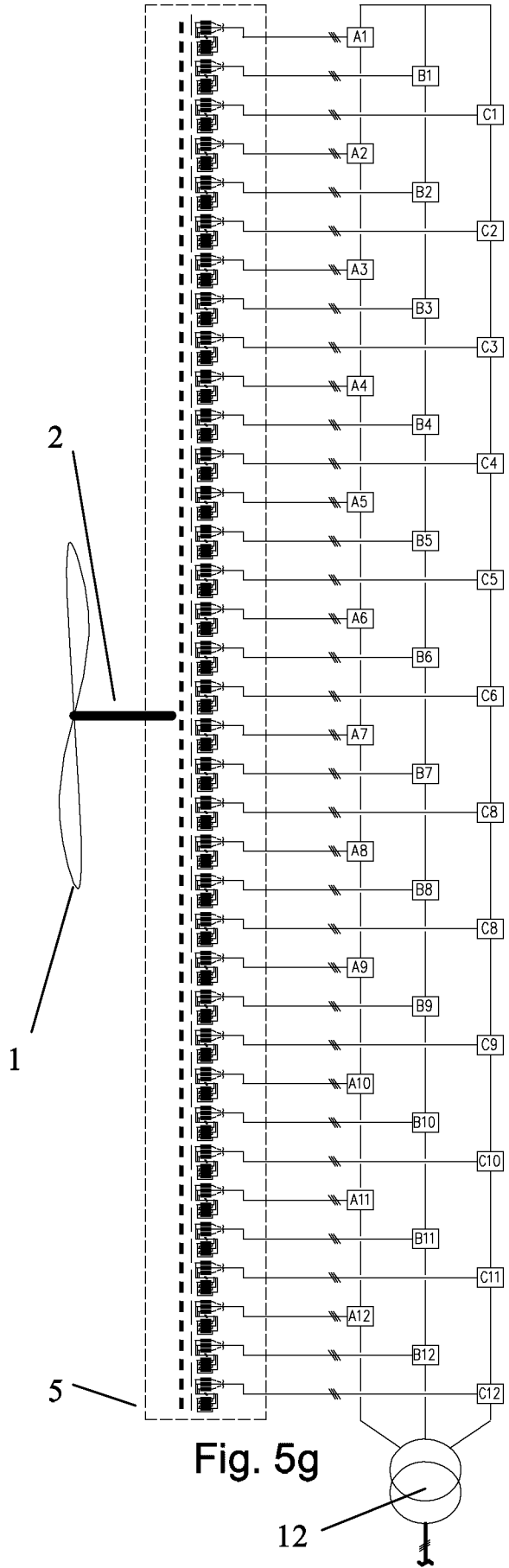
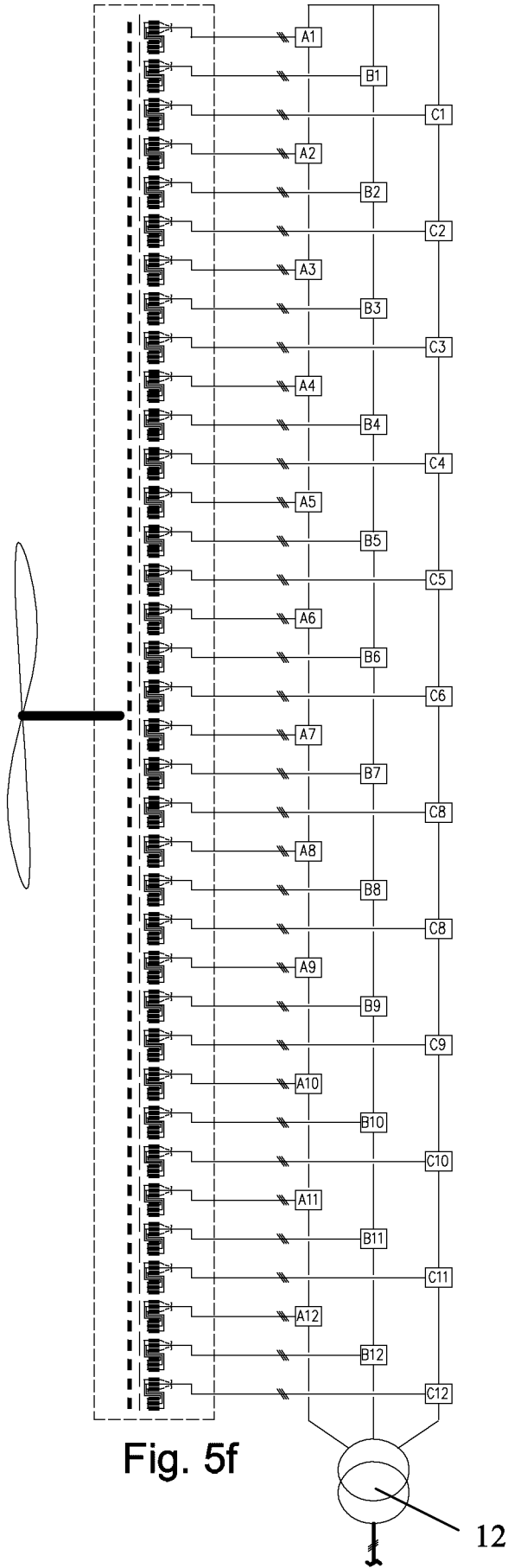


Fig. 5c





10/20

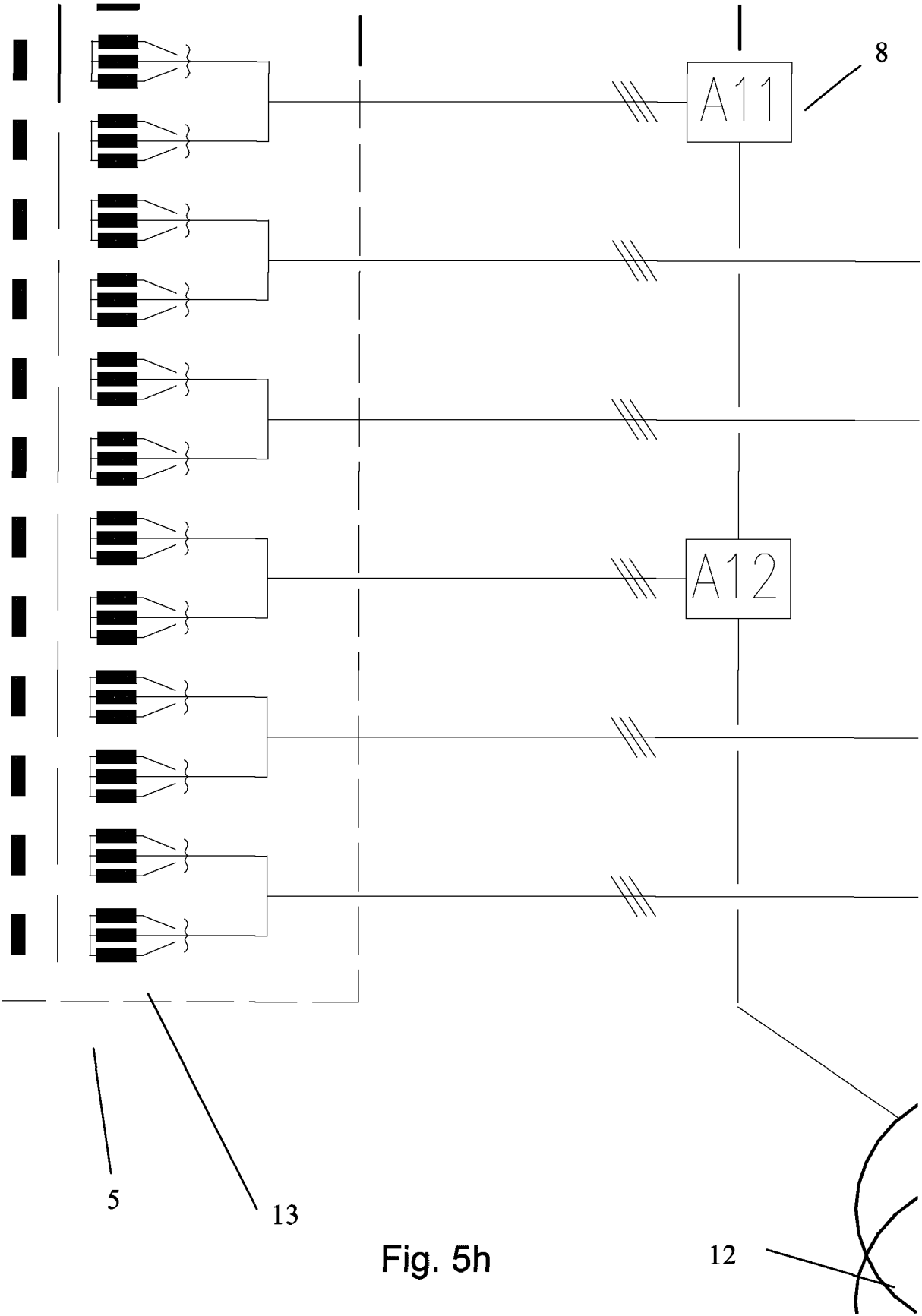


Fig. 5h

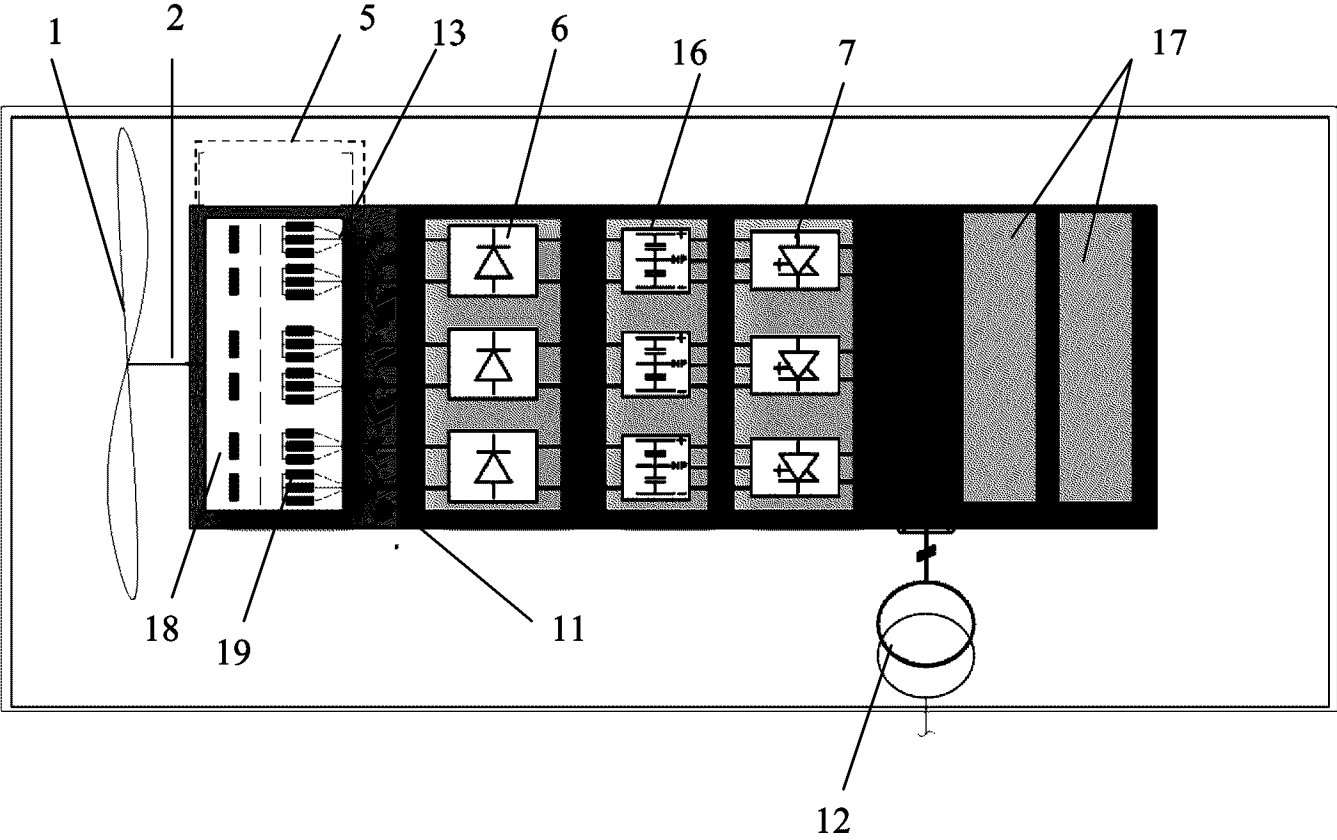


Fig. 6

12/20

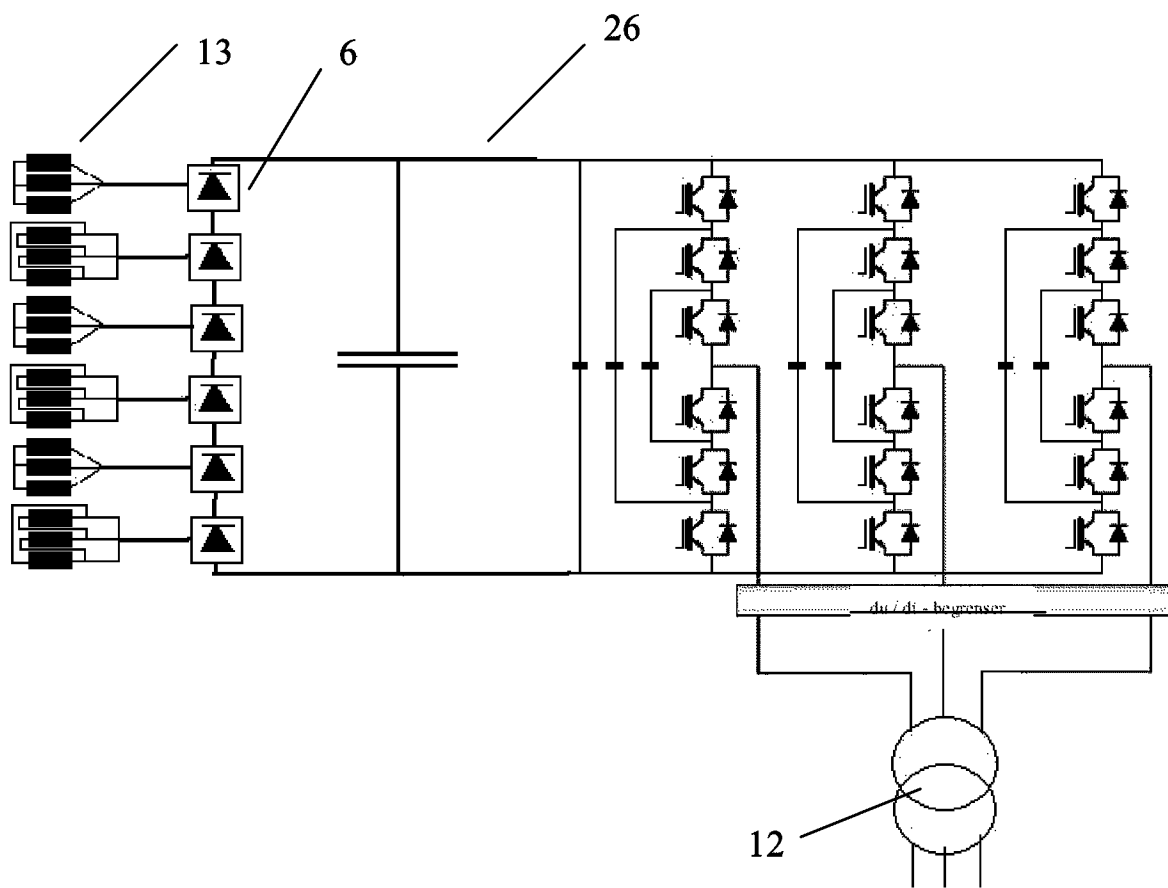


Fig. 7

13/20

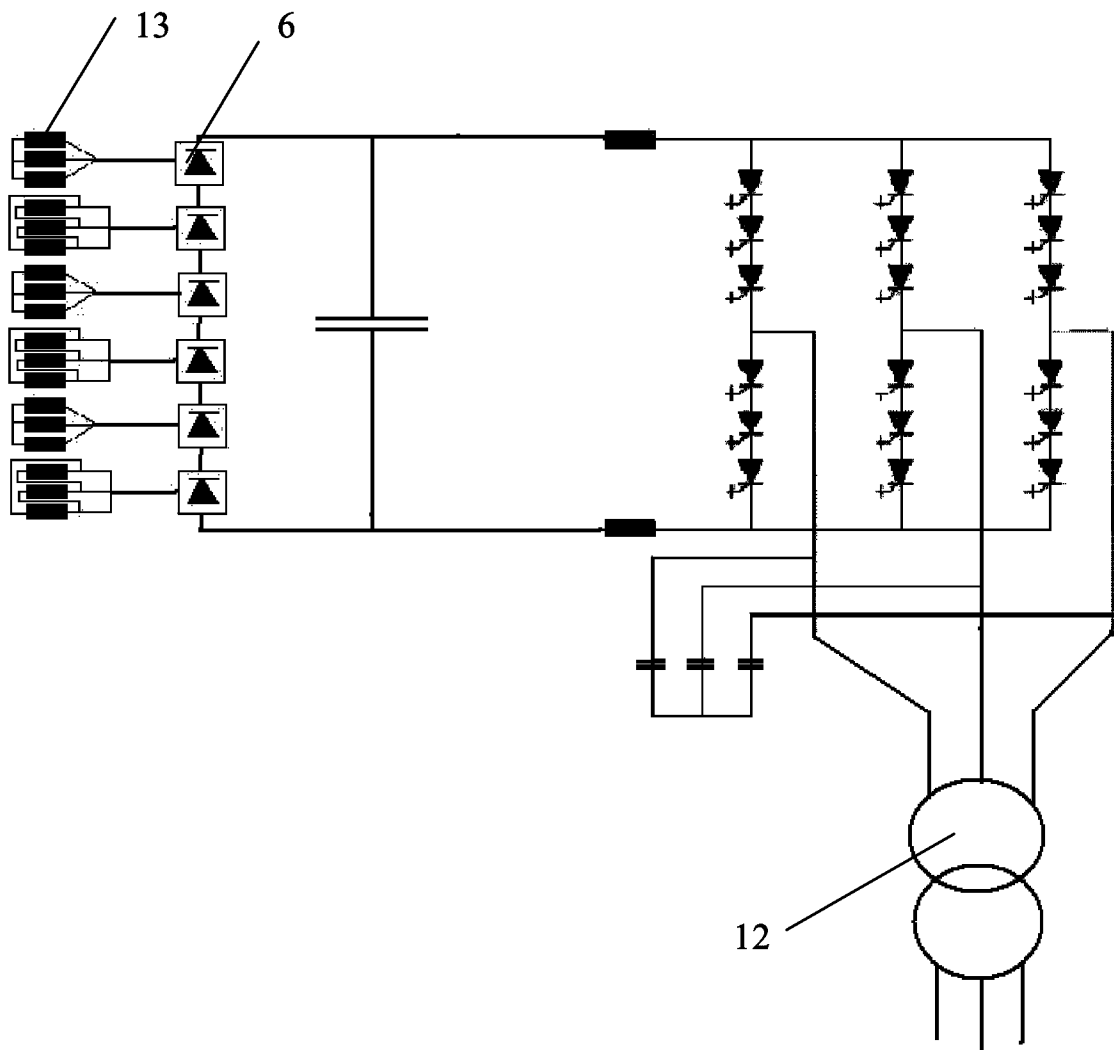


Fig. 8

14/20

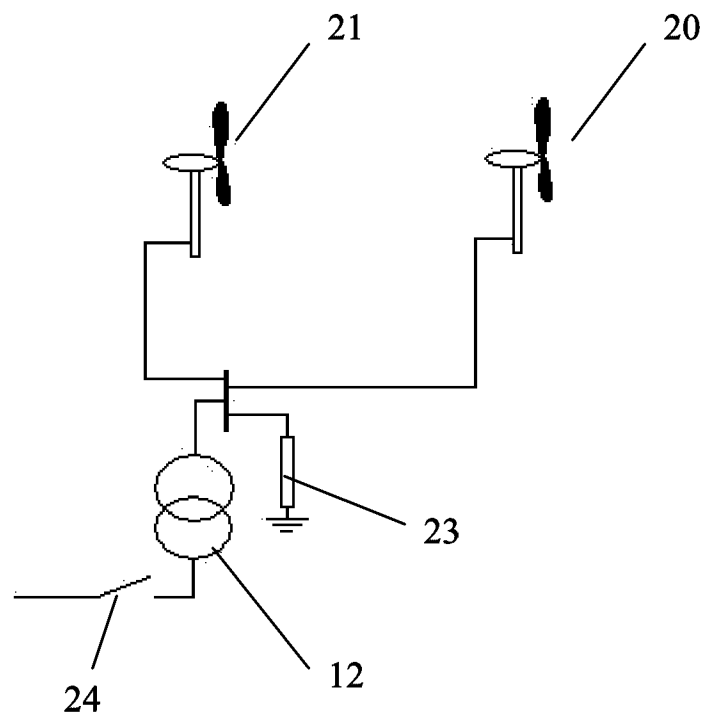


Fig. 9

15/20

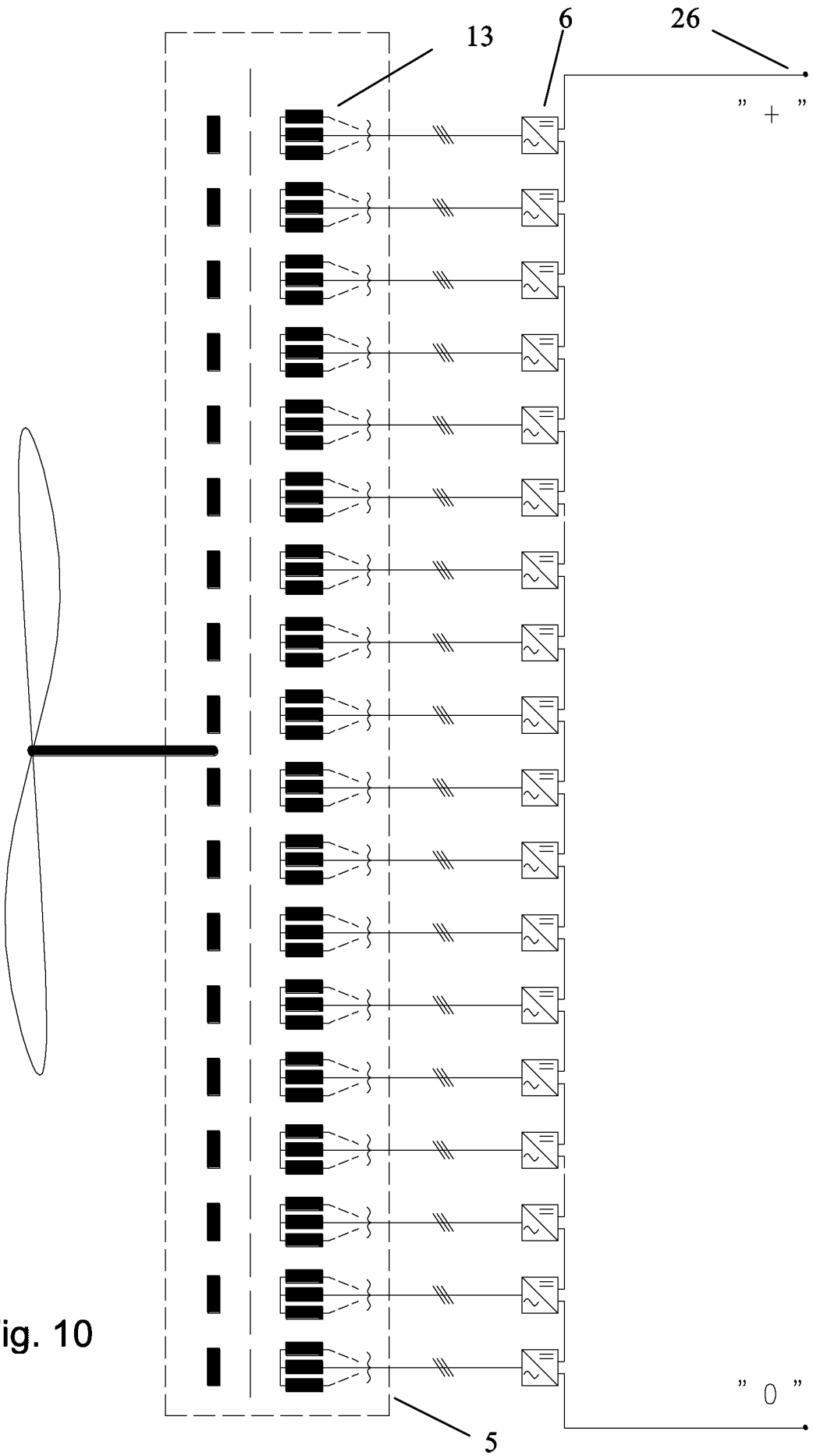
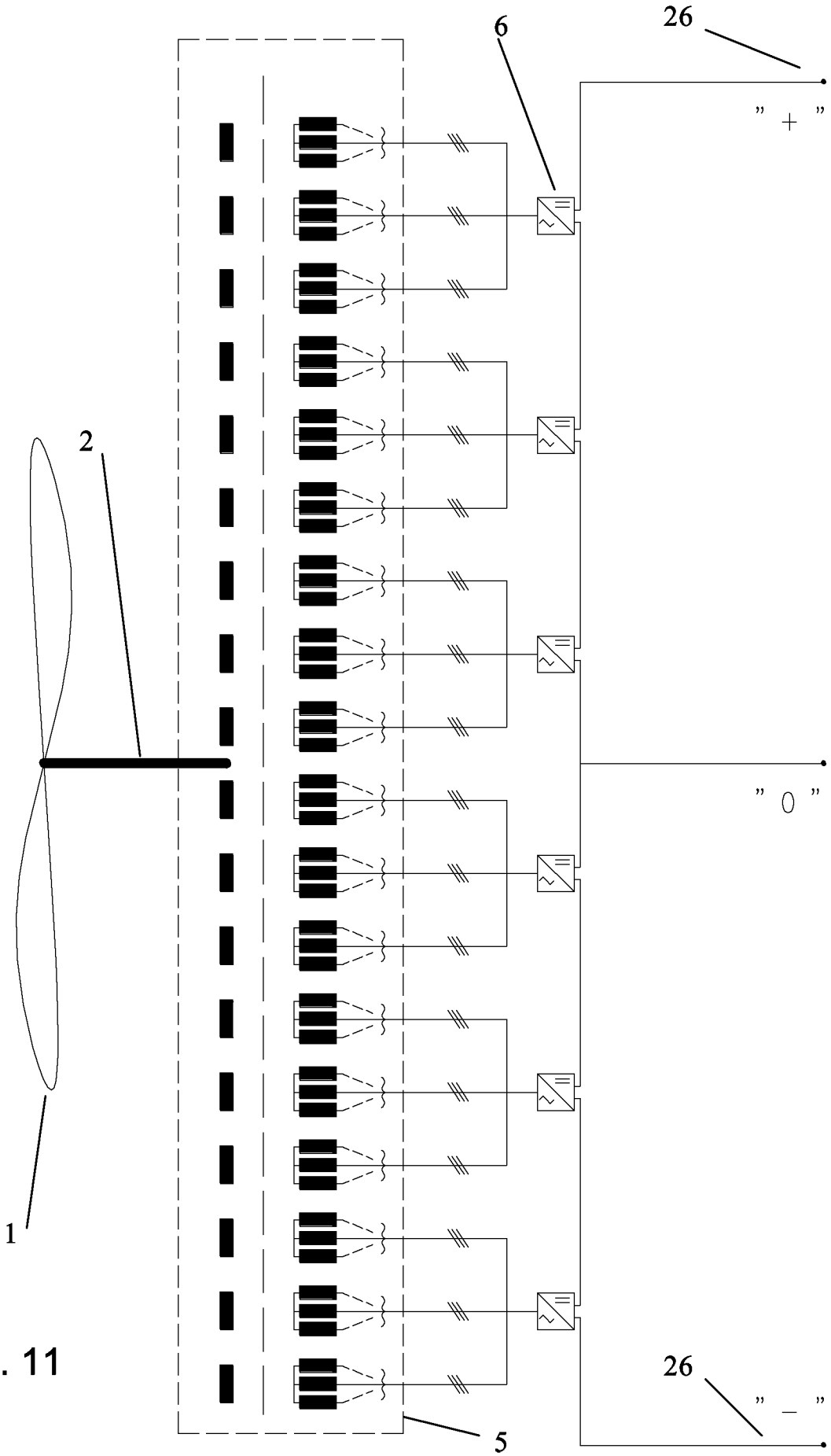


Fig. 10

Fig. 11



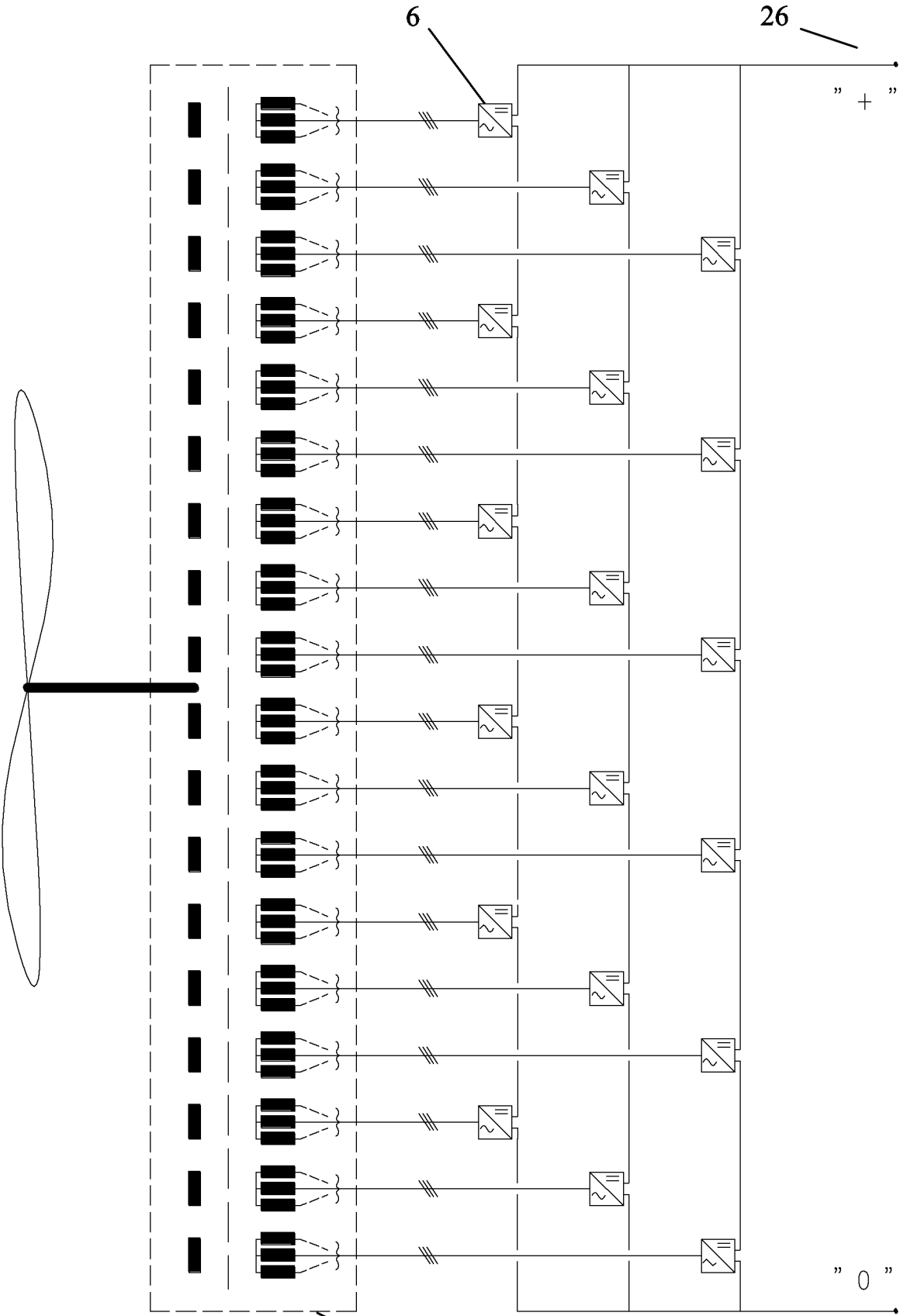


Fig. 12

18/20

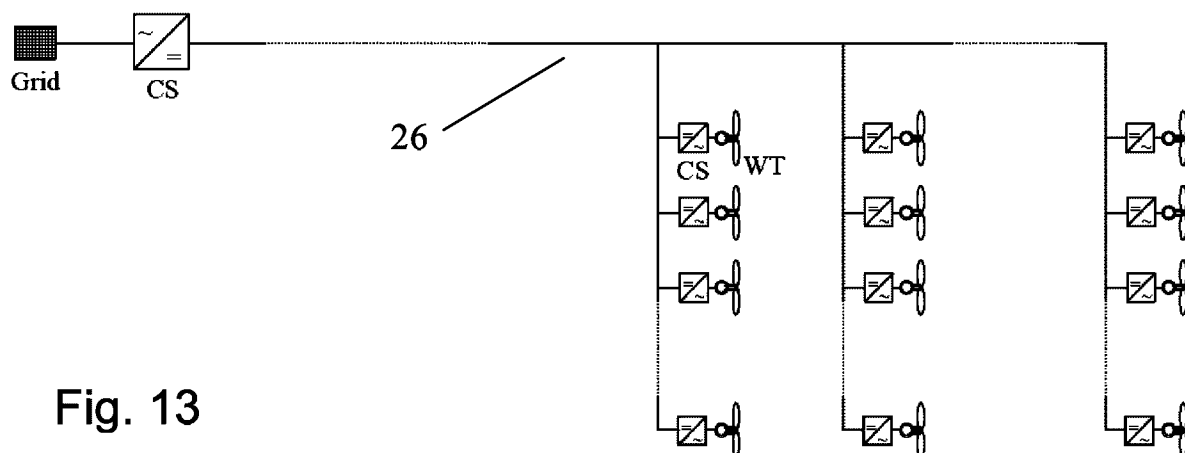


Fig. 13

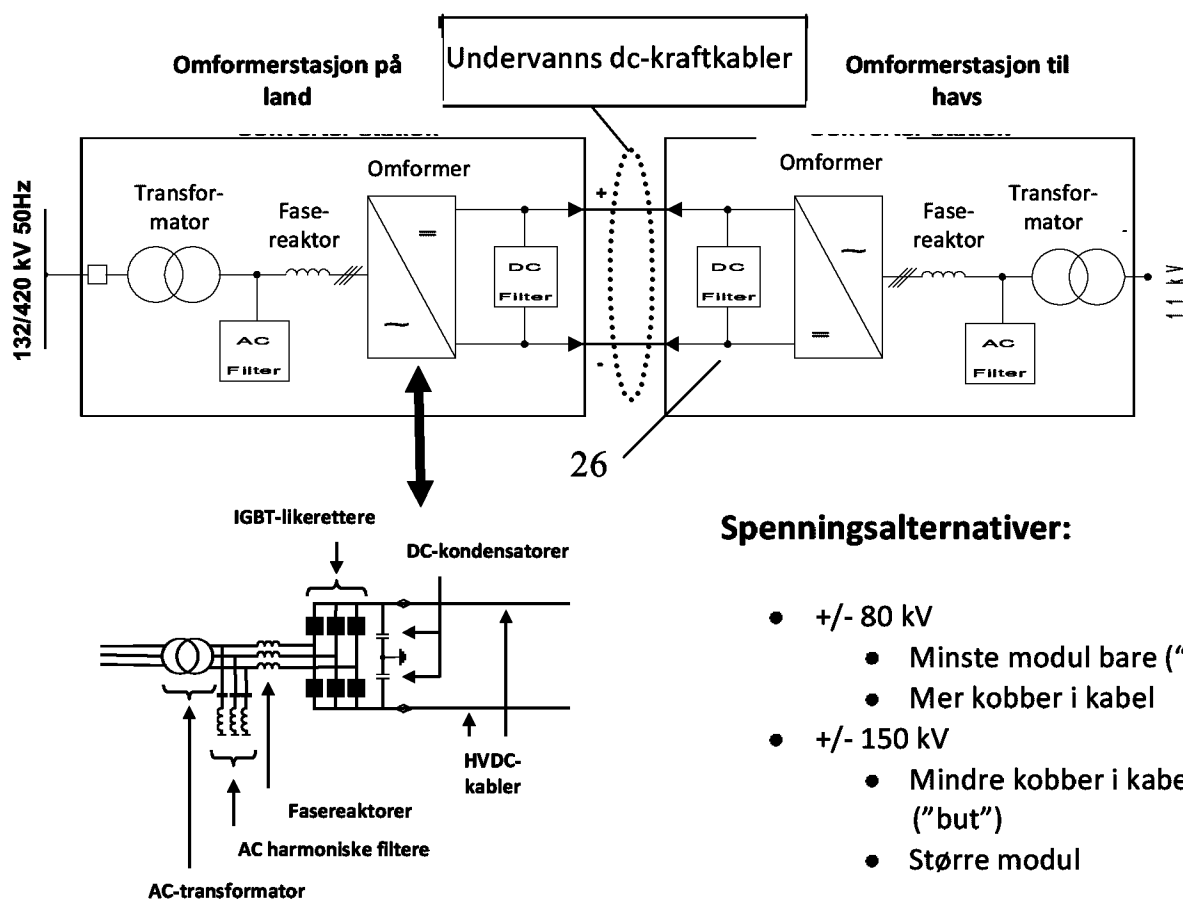


Fig. 14

Oversettelse fig. 15:

Pole Pairs = polpar,
Poles = poler,
Speed = hastighet

Pole Pairs	Poles	Speed 5Hz	Speed 10Hz	Speed 20Hz	Speed 30Hz	Speed 40Hz	Speed 50Hz	Speed 60Hz	Speed 100Hz	Speed 150Hz	Speed 200Hz
1	2	300,0	600,0	1 200,0	1 800,0	2 400,0	3 000,0	3 600,0	6 000,0	9 000,0	12 000,0
2	4	150,0	300,0	600,0	900,0	1 200,0	1 500,0	1 800,0	3 000,0	4 500,0	6 000,0
3	6	100,0	200,0	400,0	600,0	800,0	1 000,0	1 200,0	2 000,0	3 000,0	4 000,0
4	8	75,0	150,0	300,0	450,0	600,0	750,0	900,0	1 500,0	2 250,0	3 000,0
5	10	60,0	120,0	240,0	360,0	480,0	600,0	720,0	1 200,0	1 800,0	2 400,0
6	12	50,0	100,0	200,0	300,0	400,0	500,0	600,0	1 000,0	1 500,0	2 000,0
7	14	42,9	85,7	171,4	257,1	342,9	428,6	514,3	857,1	1 285,7	1 714,3
8	16	37,5	75,0	150,0	225,0	300,0	375,0	450,0	750,0	1 125,0	1 500,0
9	18	33,3	66,7	133,3	200,0	266,7	333,3	400,0	666,7	1 000,0	1 333,3
10	20	30,0	60,0	120,0	180,0	240,0	300,0	360,0	600,0	900,0	1 200,0
11	22	27,3	54,5	109,1	163,6	218,2	272,7	327,3	545,5	818,2	1 090,9
12	24	25,0	50,0	100,0	150,0	200,0	250,0	300,0	500,0	750,0	1 000,0
13	26	23,1	46,2	92,3	138,5	184,6	230,8	276,9	461,5	692,3	923,1
14	28	21,4	42,9	85,7	128,6	171,4	214,3	257,1	428,6	642,9	857,1
15	30	20,0	40,0	80,0	120,0	160,0	200,0	240,0	400,0	600,0	800,0
16	32	18,8	37,5	75,0	112,5	150,0	187,5	225,0	375,0	562,5	750,0
17	34	17,6	35,3	70,6	105,9	141,2	176,5	211,8	352,9	529,4	705,9
18	36	16,7	33,3	66,7	100,0	133,3	166,7	200,0	333,3	500,0	666,7
19	38	15,8	31,6	63,2	94,7	126,3	157,9	189,5	315,8	473,7	631,6
20	40	15,0	30,0	60,0	90,0	120,0	150,0	180,0	300,0	450,0	600,0
21	42	14,3	28,6	57,1	85,7	114,3	142,9	171,4	285,7	428,6	571,4
22	44	13,6	27,3	54,5	81,8	109,1	136,4	163,6	272,7	409,1	545,5
23	46	13,0	26,1	52,2	78,3	104,3	130,4	156,5	260,9	391,3	521,7
24	48	12,5	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0	250,0	375,0	500,0
25	50	12,0	24,0	48,0	72,0	96,0	120,0	144,0	240,0	360,0	480,0
26	52	11,5	23,1	46,2	69,2	92,3	115,4	138,5	230,8	346,2	461,5
27	54	11,1	22,2	44,4	66,7	88,9	111,1	133,3	222,2	333,3	444,4
28	56	10,7	21,4	42,9	64,3	85,7	107,1	128,6	214,3	321,4	428,6
29	58	10,3	20,7	41,4	62,1	82,8	103,4	124,1	206,9	310,3	413,8
30	60	10,0	20,0	40,0	60,0	80,0	100,0	120,0	200,0	300,0	400,0
31	62	9,7	19,4	38,7	58,1	77,4	96,8	116,1	193,5	290,3	387,1
32	64	9,4	18,8	37,5	56,3	75,0	93,8	112,5	187,5	281,3	375,0
33	66	9,1	18,2	36,4	54,5	72,7	90,9	109,1	181,8	272,7	363,6
34	68	8,8	17,6	35,3	52,9	70,6	88,2	105,9	176,5	264,7	352,9
35	70	8,6	17,1	34,3	51,4	68,6	85,7	102,9	171,4	257,1	342,9
36	72	8,3	16,7	33,3	50,0	66,7	83,3	100,0	166,7	250,0	333,3
37	74	8,1	16,2	32,4	48,6	64,9	81,1	97,3	162,2	243,2	324,3
38	76	7,9	15,8	31,6	47,4	63,2	78,9	94,7	157,9	236,8	315,8
39	78	7,7	15,4	30,8	46,2	61,5	76,9	92,3	153,8	230,8	307,7
40	80	7,5	15,0	30,0	45,0	60,0	75,0	90,0	150,0	225,0	300,0
41	82	7,3	14,6	29,3	43,9	58,5	73,2	87,8	146,3	219,5	292,7
42	84	7,1	14,3	28,6	42,9	57,1	71,4	85,7	142,9	214,3	285,7
43	86	7,0	14,0	27,9	41,9	55,8	69,8	83,7	139,5	209,3	279,1
44	88	6,8	13,6	27,3	40,9	54,5	68,2	81,8	136,4	204,5	272,7
45	90	6,7	13,3	26,7	40,0	53,3	66,7	80,0	133,3	200,0	266,7
46	92	6,5	13,0	26,1	39,1	52,2	65,2	78,3	130,4	195,7	260,9
47	94	6,4	12,8	25,5	38,3	51,1	63,8	76,6	127,7	191,5	255,3
48	96	6,3	12,5	25,0	37,5	50,0	62,5	75,0	125,0	187,5	250,0
49	98	6,1	12,2	24,5	36,7	49,0	61,2	73,5	122,4	183,7	244,9
50	100	6,0	12,0	24,0	36,0	48,0	60,0	72,0	120,0	180,0	240,0
51	102	5,9	11,8	23,5	35,3	47,1	58,8	70,6	117,6	176,5	235,3
52	104	5,8	11,5	23,1	34,6	46,2	57,7	69,2	115,4	173,1	230,8
53	106	5,7	11,3	22,6	34,0	45,3	56,6	67,9	113,2	169,8	226,4
54	108	5,6	11,1	22,2	33,3	44,4	55,6	66,7	111,1	166,7	222,2
55	110	5,5	10,9	21,8	32,7	43,6	54,5	65,5	109,1	163,6	218,2
56	112	5,4	10,7	21,4	32,1	42,9	53,6	64,3	107,1	160,7	214,3
57	114	5,3	10,5	21,1	31,6	42,1	52,6	63,2	105,3	157,9	210,5
58	116	5,2	10,3	20,7	31,0	41,4	51,7	62,1	103,4	155,2	206,9
59	118	5,1	10,2	20,3	30,5	40,7	50,8	61,0	101,7	152,5	203,4
60	120	5,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	100,0	150,0	200,0
61	122	4,9	9,8	19,7	29,5	39,3	49,2	59,0	98,4	147,5	196,7
62	124	4,8	9,7	19,4	29,0	38,7	48,4	58,1	96,8	145,2	193,5
63	126	4,8	9,5	19,0	28,6	38,1	47,6	57,1	95,2	142,9	190,5
64	128	4,7	9,4	18,8	28,1	37,5	46,9	56,3	93,8	140,6	187,5
65	130	4,6	9,2	18,5	27,7	36,9	46,2	55,4	92,3	138,5	184,6
66	132	4,5	9,1	18,2	27,3	36,4	45,5	54,5	90,9	136,4	181,8
67	134	4,5	9,0	17,9	26,9	35,8	44,8	53,7	89,6	134,3	179,1
68	136	4,4	8,8	17,6	26,5	35,3	44,1	52,9	88,2	132,4	176,5
69	138	4,3	8,7	17,4	26,1	34,8	43,5	52,2	87,0	130,4	173,9
70	140	4,3	8,6	17,1	25,7	34,3	42,9	51,4	85,7	128,6	171,4
71	142	4,2	8,5	16,9	25,4	33,8	42,3	50,7	84,5	126,8	169,0
72	144	4,2	8,3	16,7	25,0	33,3	41,7	50,0	83,3	125,0	166,7
73	146	4,1	8,2	16,4	24,7	32,9	41,1	49,3	82,2	123,3	164,4
74	148	4,1	8,1	16,2	24,3	32,4	40,5	48,6	81,1	121,6	162,2
75	150	4,0	8,0	16,0	24,0	32,0	40,0	48,0	80,0	120,0	160,0
76	152	3,9	7,9	15,8	23,7	31,6	39,5	47,4	78,9	118,4	157,9
77	154	3,9	7,8	15,6	23,4	31,2	39,0	46,8	77,9	116,9	155,8
78	156	3,8	7,7	15,4	23,1	30,8	38,5	46,2	76,9	115,4	153,8
79	158	3,8	7,6	15,2	22,8	30,4	38,0	45,6	75,9	113,9	151,9
80	160	3,8	7,5	15,0	22,5	30,0	37,5	45,0	75,0	112,5	150,0
81	162	3,7	7,4	14,8	22,2	29,6	37,0	44,4	74,1	111,1	148,1
82	164	3,7	7,3	14,6	22,0	29,3	36,6	43,9	73,2	109,8	146,3
83	166	3,6	7,2	14,5	21,7	28,9	36,1	43,4	72,3	108,4	144,6
84	168	3,6	7,1	14,3	21,4	28,6	35,7	42,9	71,4	107,1	142,9
85	170	3,5	7,1	14,1	21,2	28,2	35,3	42,4	70,6	105,9	141,2
86	172	3,5	7,0	14,0	20,9	27,9	34,9	41,9	69,8	104,7	139,5
87	174	3,4	6,9	13,8	20,7	27,6	34,5	41,4	69,0	103,4	137,9
88	176	3,4	6,8	13,6	20,5	27,3	34,1	40,9	68,2	102,3	136,4
89	178	3,4	6,7	13,5	20,2	27,0	33,7	40,4	67,4	101,1	134,8
90	180	3,3	6,7	13,3	20,0	26,7	33,3	40,0	66,7	100,0	133,3
91	182	3,3	6,6	13,2	19,8	26,4	33,0	39,6	65,9	98,9	131,9
92	184	3,3	6,5	13,0	19,6	26,1	32,6	39,1	65,2	97,8	130,4
93	186	3,2	6,5	12,9	19,4	25,8	32,3	38,7	64,5	96,8	129,0
94	188	3,2	6,4	12,8	19,1	25,5	31,9	38,3	63,8	95,7	127,7
95	190	3,2	6,3	12,6	18,9	25,3	31,6	37,9	63,2	94,7	126,3
96	192	3,1	6,3	12,5	18,8	25,0	31,3	37,5	62,5	93,8	125,0
97	194	3,1	6,2	12,4	18,6	24,7	30,9	37,1	61,9	92,8	123,7
98	196	3,1	6,1	12,2	18,4	24,5	30,6	36,7	61,2	91,8	122,4
99	198	3,0	6,1	12,1	18,2	24,2	30,3	36,4	60,6	90,9	121,2
100	200	3,0	6,0	12,0	18,0	24,0	30,0	36,0	60,0	90,0	120,0
101	202	3,0	5,9	11,9	17,8	23,8	29,7	35,6	59,4	89,4	118,8

Fig.
15

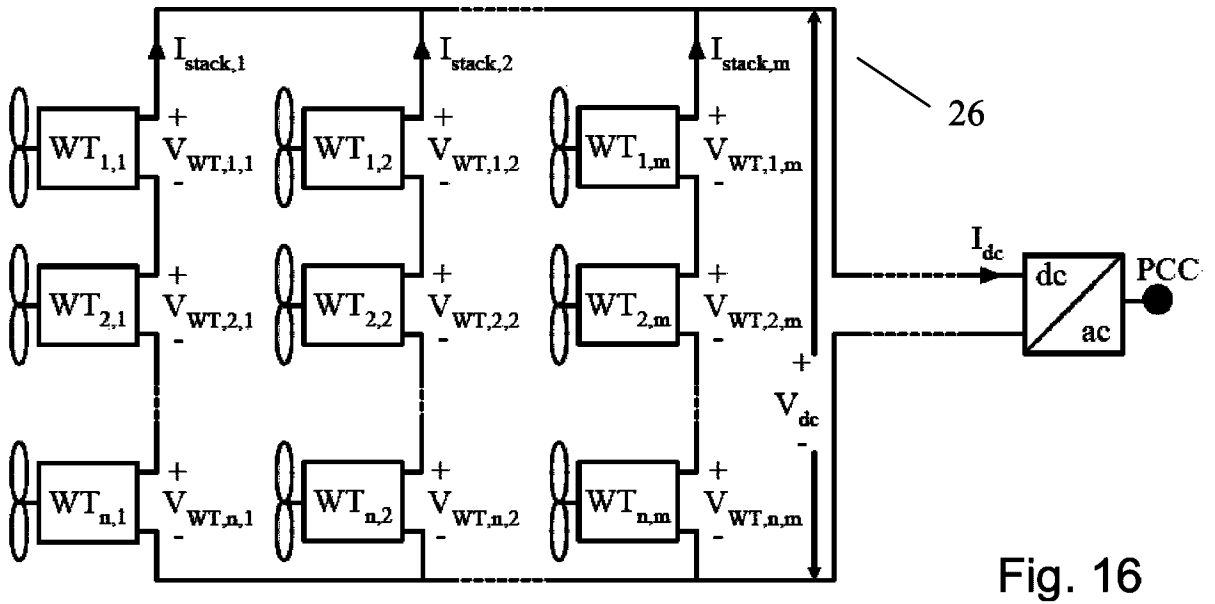


Fig. 16

Oversettelse figur 16: wt = vekt, stack = stakk

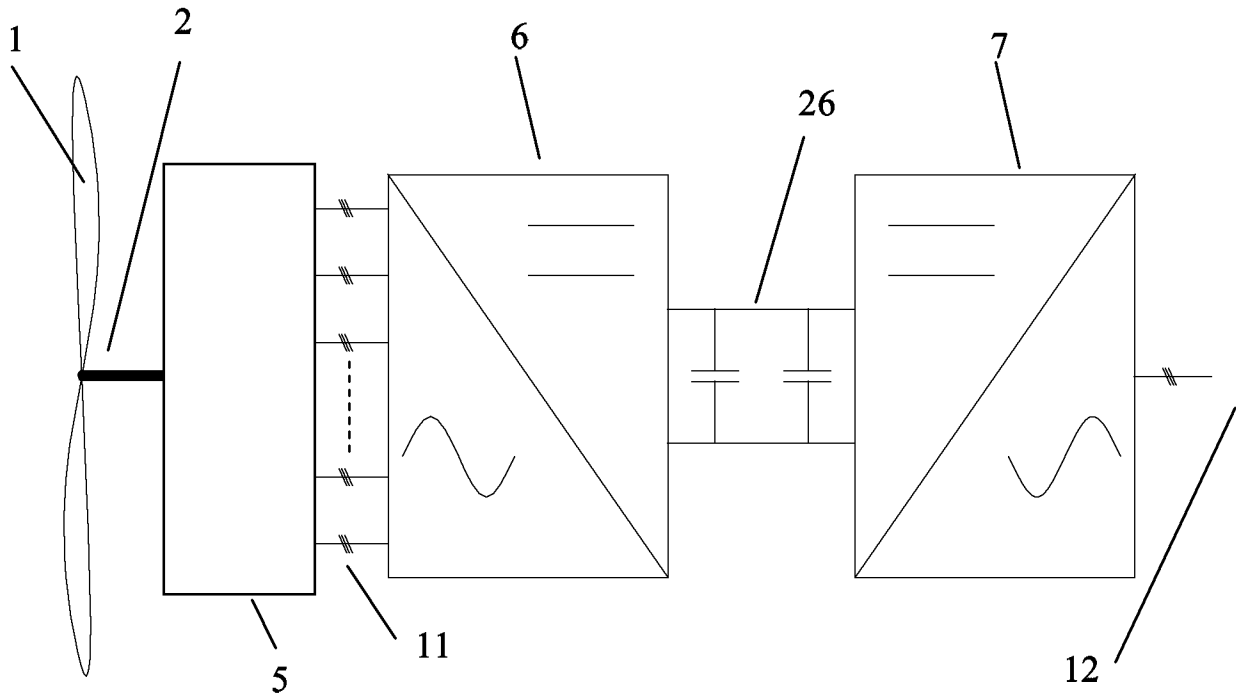


Fig. 17