



(12) **PATENT**

(19) **NO**

(11) **328080**

(13) **B1**

NORGE

(51) Int Cl.
G05B 13/04 (2006.01)
C25C 3/20 (2006.01)

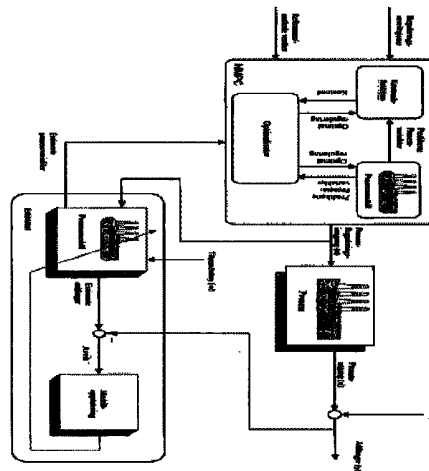
Patentstyret

(21)	Søknadsnr	20075933	(86)	Int.inng.dag og søknadsnr
(22)	Inng.dag	2007.11.19	(85)	Videreføringsdag
(24)	Løpedag	2007.11.19	(30)	Prioritet
(41)	Alm.tilgj	2009.05.20		
(45)	Meddelt	2009.11.30		

(73)	Innehaver	Norsk Hydro ASA, 0240 OSLO
(72)	Oppfinner	Steinar Kolås, Saglassveien 9, 7054 RANHEIM
(74)	Fullmektig	André Berg, c/o Hydro Aluminium AS, Patent- og varemerkeavdelingen, 0240 OSLO

(54)	Benevnelse	Fremgangsmåte og anordning for styring av en elektrolysecelle
(56)	Anførte publikasjoner	NO 166821 B, EP B1 211 924
(57)	Sammendrag	

Fremgangsmåte og anordning for å regulere en elektrolysecelle for aluminiumsproduksjon ved hjelp av prosessreguleringsinngang, som innbefatter middel for å måle en eller flere prosessvariabler, der den/de målte verdien(e) føres til en estimator. Estimatoren kan være av kalmanfiltertypen, og estimerer den nåværende verdien av en eller flere prosessvariabler og predikerer deretter verdien av nevnte prosessvariabel/-variabler og/eller en annen prosessvariabel/andre prosessvariabler. Den/de predikerte verdien(e) brukes til å beregne et framtidig scenario for reguleringsinngangen ved hjelp av en kalkulator. Verdien(e) av prosessvariabelen(-variablene) predikeres etter en ikke-lineær dynamisk modell som er en enhetlig del av prosessregulatoren.



- 5 Den foreliggende oppfinnelsen dreier seg om en fremgangsmåte og anordning for å regulere en elektrolysecelle for produksjon av aluminium. Oppfinnelsen bruker et ikke-lineært modellprediktivt reguleringsystem (NMPC) der en modell av prosessen brukes til å predikere det framtidige forløpet av prosessen. Dessuten brukes det en estimatorfunksjon for å danne estimater av prosessdata i nåtid basert på historiske data.
- 10 Fordelene med den framlagte oppfinnelsen er at elektrolysecellen kan reguleres slik at prosessvariasjonene reduseres. Dermed kan driften av elektrolysecellen føres nærmere driftsmål og prosessgrenser, og oppnå lavere utslipp til miljøet kombinert med stabil og mer effektiv produksjon.
- 15 Bruk av NMPC til å regulere industriprosesser er for eksempel kjent fra oljeraffineriindustrien, der denne typen regulering har vært i utstrakt bruk.
- 20 Et søk utført av søkeren har imidlertid ikke funnet bruk av ikke-lineær MPC (NMPC) i metallurgiindustrien. Vi erkjenner ut fra (F.J. Stevens, McFadden, JOM, februar 2006) at lineær MPC er nevnt som et alternativ til det undersøkte reguleringskjemaet for å regulere de elektrolyttvariablene som ikke dreier seg om alumina i aluminiumselektrolyse-celler basert på en modell identifisert ut fra inn- og utgang. En viktig forskjell mellom MPC og NMPC er at MPC bruker en lineær modell mens NMPC bruker en ikke-lineær modell.
- 25 Fra en teoretisk synsvinkel vil en ikke-lineær modell forandre reguleringsproblemet fra et konvekst QP (kvadratisk program) til et ikke-konvekst ikke-lineært program (NLP), som det er mye vanskeligere å løse. Under løsning av et ikke-konvekst NLP, er det ingen garanti for å finne det globale optimumet. Dette innebærer at fininnstilling av NMPC-regulatorer kan bli svært vanskelig, spesielt ved modellavvik.
- 30 US patent 4,814,050 er representativ for dagens lineære regulatorer som omfatter å bruke en estimator med to sett likninger, en tidsoppdaterende algoritme som inneholder en dynamisk modell av aluminamassebalansen i cellen og gir estimater over aluminakonsentrasjonen, og en målealgoritme som bruker en tilbakemeldt
- 35 prosessvariabel fra cellen til å modifisere aluminaestimatet.

Å regulere aluminareduksjonsprosessen er en utfordring på grunn av de ikke-lineære prosesseegenskapene, samvirkende masse- og energibalanse og få målinger.

5 Mens regulering av Al_2O_3 regnes som 'løst', har diskusjonene i litteraturen de siste ti til femten årene dreid seg om å regulere badtemperaturen og AlF_3 . Felles for disse bidragene er at tilførselen av AlF_3 beregnes som en funksjon av avviket fra den ønskede surheten og/eller den ønskede badtemperaturen.

10 Det er velkjent i aluminiumskretser at både tilførsel av AlF_3 og badtemperaturen har innflytelse på surheten på grunn av variasjon i tykkelsen av sidebelegget. Forholdet mellom badtemperaturen og surheten omtales som temperatur/surhet-korrelasjonen, eller bare korrelasjonslinjen.

15 I henhold til den foreliggende oppfinnelsen er én (matematisk) modell en teoretisk representasjon av aluminiumselektrolysecellen. Modelleringsmetodikken i den foreliggende oppfinnelsen er basert på grunnprinsipper. Dette betyr at modellen som beskriver prosessen er basert på en fundamental forståelse av fysikken som beskriver varme- og masseoverføringsrelasjoner og grunnleggende relasjoner mellom fysiske egenskaper. Modellering etter grunnprinsipper gjøres vanligvis med ikke-lineære differensiallikninger og gir dermed en ikke-lineær modell. Ved hjelp av kjemisk og termodynamisk teori (grunnprinsipper) beskrives masse- og energibalansen i cellen slik at forløpet av et valgt sett prosessvariabler over tid og forholdet mellom dem kan bestemmes (eller estimeres). Det valgte settet av modellerte prosessvariabler er gjerne tykkelsen av sidebelegget, massen av det flytende badet og metallet, konsentrasjonen og massen av AlF_3 , konsentrasjonen og massen av Al_2O_3 , massen av slam, badtemperaturen, katodetemperaturen, diverse varmestrømmer, bad- og metallnivået og den tilsynelatende motstanden, for å nevne de viktigste.

30 Modellen representerer en idealisert situasjon, og vil til en viss grad avvike fra den fysiske prosessen på grunn av usikkerhet i modellen. For at modellen skal virke i en ikke-ideell situasjon, brukes estimeringsmetoder som betegnes Kalman-filtrering.

Tilstandsestimering med kalmanfilter er i og for seg kjent for eksempel fra US patent 6757579.

35 Tilstandsestimering med kalmanfilter til celler for aluminiumsreduksjon er kjent fra «Estimation of states in aluminium reduction cells applying extended kalman filtering

algorithms together with a nonlinear dynamic model og discrete measurements»

T. Saksvikrønning, K. Vee, E. Gran (Light Metals 1976, s. 275-286)

5 Ved å bruke kalmanfiltermetoder, justerer man for modellusikkerheten på grunnlag av de opplysningene som er tilgjengelige i målingene av prosessvariabler (et utvalg av alle prosessvariablene) og prosesstiførlene. Målingene er gjerne den tilsynelatende motstanden, badtemperaturen, katodetemperaturen, nivået av flytende bad og metall og konsentrasjonen av AlF_3 . Prosessinngangene er gjerne linjestrømmen, de tilsatte massene, anodebevegelsene og hendelser (anodeeffekt, metalltapping, tapping/tilførsel av flytende bad, anodeskift).
10

Basert på opplysningene som er tilgjengelige gjennom inngangene og målingene, er resultatet av modelljusteringen et mer nøyaktig estimat av det valgte settet av prosessvariabler på den gitte tiden.
15

I henhold til oppfinnelsen kan prosessvariabler som er vanskelige eller umulige å måle estimeres og predikeres og brukes i en regulator, slik at det er mulig å oppnå bedre regulering av masse- og energibalansen i aluminiumselektrolysecellen.

20 Både de ovennevnte fordelene og andre fordeler kan oppnås med oppfinnelsen som definert i patentkrav 1-15.

Oppfinnelsen beskrives videre med eksempler og figurer der:

Fig. 1 viser en skisse av de viktigste kjennetegnene til en aluminareduksjonscelle (forhånds Brent),
25

Fig. 2 viser kjent regulering av en elektrolysecelle (justering av anodebjelkene for å regulere energitilførselen, tilførsel av AlF_3 og tilførsel av Al_2O_3),

30 Fig. 3 viser en NMPC-regulator,

Fig. 4 viser ett estimat av aktuelle reguleringsvariabler,

35 Fig. 5 er et diagram som viser et beregnet framtidig optimalt inngangsscenario (u),

Fig 6 er et diagram som viser et beregnet nytt estimat av reguleringsvariabler basert på nye målinger og inngang, og

Fig. 7 viser et diagram som representerer det beregnede nye framtidige inngangsscenariet (u).

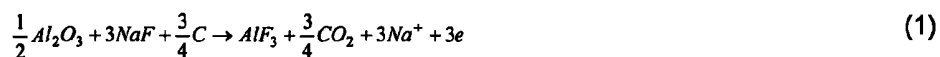
Hall-Héroutl-prosessen for aluminiumsproduksjon.

- 5 Hall-Héroutl-prosessen, som er oppkalt etter oppfinnerne, er den mest brukte fremgangsmåten for å produsere aluminium industrielt i dag. Flytende aluminium produseres ved elektrolytisk reduksjon av alumina (Al_2O_3) løst i en elektrolytt, som kalles bad, og hovedsakelig består av kryolitt (Na_3AlF_6). Figur 1 viser en skisse av cellen for aluminareduksjon.

10

I cellen for aluminareduksjon, heretter omtalt som cellen, er en (Søderberg) eller flere (forhåndsbrante) karbonanoder dyppet ned i badet. Aluminaen forbrukes elektrokjemisk ved anoden.

- 15 Som man kan se av likning (1), forbrukes karbonanoden under prosessen (teoretisk 333 kg C/t Al).



- 20 Den nedre delen av cellen, katoden, består av et stålhylster som er foret med ildfast varmeisolasjon. Det danner seg en dam av flytende aluminium oppå karbonbunnen. Katoden er i elektrokjemisk betydning interfasen mellom den flytende aluminiumen og badet, beskrevet av



og den totale cellereaksjonen blir



30

- Rent bad (Na_3AlF_6) har smeltepunkt 1011 °C. For å senke smeltepunktet, likvidustemperaturen, tilsettes badet aluminiumfluorid (AlF_3) og kalsiumfluorid (CaF_2), for å nevne de to viktigste. Sammensetningen i badet i en celle kan typisk være 6-13 [vekt-%] AlF_3 , 4-6 [vekt-%] CaF_2 og 2-4 [vekt-%] Al_2O_3 . Når likvidustemperaturen senkes, kan cellen kjøres med lavere badtemperatur, men med lavere løselighet av Al_2O_3 i badet, noe

som krever god Al_2O_3 -regulering. Det må nevnes at hvis konsentrasjonen av Al_2O_3 blir for lav (mindre enn ca. 1,8 vektprosent), kommer cellen i en tilstand som kalles anodeeffekt. Under anodeeffekten øker celledspenningen fra det normale 4-4,5 V til 20-50 V. Anodeeffekt er en høyst uønsket tilstand, ikke bare fordi den representerer sløsing med energi og forstyrrer energibalansen, men også fordi det produseres drivhusgasser (CF_4 og C_2F_6) ved anoden. Anodeeffekt krever svært ofte manuelt inngrep av en operatør.

Badtemperaturen under normal drift i cellen er mellom 940 °C og 970 °C. Badet forbrukes ikke under den elektrolytiske prosessen, men det tapes noe, hovedsakelig på grunn av fordamping. Dampen består hovedsakelig av $NaAlF_4$. I tillegg tapes det litt bad ved at det føres med små dråper, og vann i aluminaråstoffet reagerer til HF. For å beskytte miljøet, tar man vare på gassen og renser den i et gassvaskesystem. Mer enn 98 % av alt AlF_3 gjenvinnes i vaskesystemet og resirkuleres tilbake til cellene. I tillegg vil innholdet av natriumoksid (Na_2O) og kalsiumfluorid (CaF_2) i det tilførte Al_2O_3 nøytralisere AlF_3 . Den nøytraliserte mengden er også en funksjon av hvor mye natrium som trenger inn i katoden, og dermed av alderen til cellen. Som et eksempel avgir en 170 kA celle omtrent 60 ekvivalente kg AlF_3 pr. døgn, og bruker omtrent 2500 kg Al_2O_3 pr. døgn. For en 170 kA celle utgjør AlF_3 som skyldes nøytralisering mellom 0 og 20 kg i døgnet (avhengig av cellens alder). Men siden AlF_3 for det meste blir resirkulert, er det virkelige forbruket av AlF_3 svært lite i forhold til forbruket av Al_2O_3 .

På sideveggene av katoden er det et frossent lag som kalles sidebelegget og som beskytter sideveggen av karbon mot erosjon. Sidebelegget består hovedsakelig av rent Na_3AlF_6 med litt CaF_2 . Tykkelsen av sidebelegget er en funksjon av varmestrømmen gjennom sidene, som er en funksjon av forskjellen mellom badtemperaturen og likvidustemperaturen. Siden det antas at sidebelegget hovedsakelig består av Na_3AlF_6 , betyr dette at den totale massen av kryolitt i badet varierer, mens massene av AlF_3 og Al_2O_3 ikke varierer med tykkelsen av sidebelegget. Dessuten, siden konsentrasjonen av en tilsetning er massen av tilsetningen dividert med den totale massen av bad, innfører variasjonen i tykkelsen av sidebelegget variasjon i konsentrasjonene. Dermed innfører endringene i konsentrasjonene endringer i likvidustemperaturen, som innfører endringer i overhetingsvarmen, som innvirker på tykkelsen av sidebelegget.

Utfordringen er dermed å sikre stabil celledrift som gir et stabilt beskyttende sidebelegg, samtidig som energitilførselen reduseres til et minimum og produksjonen økes til et maksimum.

Gitt rimelige driftsmål er det en etablert driftspraksis at reduksjon av prosessvariasjonene rundt målverdiene fører til god prosessdrift med hensyn til minimal forurensning av miljøet, maksimal produksjon og minimale utgifter. I sammenheng med en celle for aluminareduksjon bør det fokuseres på lav hyppighet av anodeeffekt, effektiv gassvasking og lavt avvik fra målet for aluminakonsentrasjonen, badtemperaturen og surheten. Hvis reguleringen av aluminakonsentrasjonen er rimelig god, må det fokuseres på regulering av badtemperaturen og AlF_3 .

Hvis badtemperaturen øker, synker surheten mens ledningsevnen i badet øker. Ifølge tidligere undersøkelser i den åpne litteraturen, dominerer variasjonen i badtemperaturen over variasjonen i surheten.

«Kjønt teknikk» i prosessregulering for aluminiumselektrolyseceller

Det finnes to viktige maskinvarearkitekturer for regulering av elektrolyseceller, nemlig de sentraliserte og de desentraliserte. I den sentraliserte arkitekturen beregnes inngangene for prosessreguleringen av en sentralisert datamaskin og fordeles så til lokale reguleringsenheter på hver aluminiumselektrolysecelle. I de desentraliserte arkitekturer beregnes inngangene for prosessreguleringen av en desentralisert datamaskin, som vanligvis befinner seg i nærheten av aluminiumselektrolysecellen.

Ved regulering av en elektrolysecelle har det hittil gjerne vært brukt tre viktige regulerte variabler: badtemperaturen, konsentrasjonen av AlF_3 og konsentrasjonen av Al_2O_3 , og tre reguleringsinngang: anodebjelkejustering (som regulerer energitilførselen), tilførsel av AlF_3 og tilførsel av Al_2O_3 (se figur 2).

Dynamikken i reduksjon av massen av AlF_3 er langsom (hvis man går ut fra at det ikke tilsettes soda), og regulering av AlF_3 -konsentrasjonen må ta hensyn til langsom respons ved endring av AlF_3 -konsentrasjonen.

Dynamikken for massen av Al_2O_3 er rask, og regulering av Al_2O_3 -konsentrasjonen må ta hensyn til rask respons. Regulering av Al_2O_3 -konsentrasjonene regnes vanligvis som et isolert problem.

Badtemperaturen måles vanligvis manuelt en gang om dagen eller i det minste en gang i uka. I noen teknologier er det mulig å måle badtemperaturen automatisk. Konsentrasjonen av AlF_3 (surhet) måles gjerne manuelt en eller to ganger i uka, mens konsentrasjonen av Al_2O_3 vanligvis ikke måles i det hele tatt, bare i forbindelse med eksperimenter.

De eneste kontinuerlige målingene er den tilsynelatende motstanden i badet R_b , definert som:

$$5 \quad R_b = \frac{U_{cell} - U_{ext}}{I} \quad [\mu\Omega] \quad (4)$$

R_b brukes som inngang for justering av anodebjelken, og fungerer som reguleringsvariabel sammen med energitilførselen til cellen.

- 10 Fordi energibalansen og massebalansen er forbundet gjennom sidebelegget, må regulering av cellen regnes som et ikke-lineært multivariabelt reguleringsproblem.

Selv om reguleringsproblemet er et ikke-lineært multivariabelt reguleringsproblem, løses det vanligvis som om det var et lineært ikke-multivariabelt reguleringsproblem. D.v.s. ved
15 å bruke lineære enkeltsløyferregulatorer (d.v.s. at en regulator regulerer én prosessvariabel), gjerne en regulator for alumina regulering, en for AlF_3 -regulering og en for regulering av energi/temperatur i badet.

Målingene fungerer som inngang til regulatorene. Alumina-regulatoren bruker gjerne
20 målingen av den tilsynelatende motstanden, AlF_3 -regulatoren bruker en kombinasjon av målinger av AlF_3 og badtemperaturen. Utgangen fra en AlF_3 -regulator kan gjerne være $c_1(T_b - T_{bRef}) + c_2(AlF_3 - AlF_{3ref})$, der c_1 og c_2 er teknologispesifikke konstanter. Noen teknologier brukes også målinger av badtemperaturen til å justere energitilførselen (spenningen) til cellen.

25 Disse lineære enkeltsløyferregulatorene vil vanligvis ikke «samarbeide» (ikke en multivariabelt reguleringsordning), til tross for at noen teknologier faktisk bruker en viss kobling mellom AlF_3 -regulering og regulering av energien/badtemperaturen. Dessuten båndlegges disse lineære regulatorene av mye heuristikk og regler.

30 Andre målinger, som vanligvis ikke brukes i automatisk regulering, er måling av badnivået, metallnivået og massen til det avtappede metallet.

Den foreliggende oppfinnelsens prosessregulering for aluminiumselektrolyseceller:

35 Ved ikke-lineær modellprediktiv regulering (NMPC) forstår vi å bruke en ikke-lineær dynamisk modell, tilstandsestimering (prosessvariabelestimering) og løse et ikke-lineært

optimaliseringsproblem på prosesslinjen med restriksjoner, for å beregne reguleringsinngangene til den fysiske prosessen. Se også Fig. 3.

Figur 3 illustrerer de forskjellige modulene av oppfinnelsen. Modulen med betegnelsen «Prosess» skal illustrere den fysiske prosessen – en instans av aluminiumselektrolyse-
5 cellen. Til «prosessen» kan man bruke prosessens reguleringstilførsel (masse og energi) og måle noen prosessutganger. Målingen kan bare gjøres opp til et visst nøyaktighetsnivå. Unøyaktighetsnivået beskrives som «målestøy». Modulen med betegnelsen «Estimator» inneholder en matematisk modell av «prosessen». «Prosessen»
10 beskrives ved å bruke modelleringsmetoder basert på «grunnprinsipper», og gir flere prosessparametere og prosessvariabler som brukes ved estimering av den nåværende verdien av de nevnte variablene. Modellen inneholder også partielle differensiallikninger (PDE), som oppfanger den tidsderivate av et utvalg av prosessvariablene. Dette utvalget kalles prosesstilstander.

15 Siden kunnskap om prosesstilstander og variabler kan anses for forenklede versjoner av den egentlige sannheten, kan avviket betraktes som en usikkerhet – her betegnet som «tilstandsstøy». Dessuten føres verdien av prosessens reguleringstilførsel og verdien av målingene også inn som inngang til «estimatoren». Basert på kunnskap om prosessens reguleringstilførsel og målingene, skal «estimatoren» beregne et estimat av de
20 nåværende prosessvariablene (prosesstilstander, estimerte parametere og målinger). De estimerte målingene blir så sammenliknet med de fysiske målingene, og avviket brukes til å justere modellen slik at avviket blir minst mulig. Denne metoden kalles kalmanfilter-estimering.

25 De estimerte målingene, tilstandene og parameterne er utgang fra «estimatoren», og fungerer som inngang til den ikke-lineære modellprediktive reguleringen (NMPC). «NMPC»-modulen bruker et utvalg av de estimerte prosessvariablene (RV), vanligvis sammen med noen referanseverdier og restriksjoner, til å beregne det optimale framtidige inngangsscenarioet for prosessreguleringen (MV) for å flytte prosessen fra det nåværende
30 arbeidspunktet (gitt av estimatet), til arbeidspunktet som er gitt av referanseverdiene. Det optimale framtidige inngangsscenarioet for prosessreguleringen vil vanligvis ligge innenfor en endelig framtidig tidsramme. Siden strategien arbeider i den diskrete tidsrammen, vil det optimale framtidige inngangsscenarioet for reguleringen beregnet for hvert tidstrinn (for
35 eksempel hvert 5. minutt), basert på oppdaterte prosessvariabelestimater, som også er tilgjengelige for hvert tidstrinn. Imidlertid brukes bare den første verdien av det framtidige inngangsscenarioet for prosessreguleringen på den fysiske prosessen. Det optimale

inngangsscenariet for reguleringen finnes ved å løse et optimaliseringskriterium, ved å redusere det til et minimum med hensyn til predikerte prosessvariabler og annet. Forutsigelsene stammer fra bruk av den ikke-lineære dynamiske modellen til å predikere de framtidige verdiene av prosessvariablene. Optimalisatoren som brukes er en optimalisator som kan løse ikke-lineære problemer med restriksjoner (vanligvis SQP). Den ikke-lineære prosessmodellen i «NMPC»-modulen er i denne realiseringen av oppfinnelsen den samme som den ikke-lineære modellen i «Estimator»-modulen.

10 I beskrivelsen av denne oppfinnelsen vil vi bruke følgende termer: Definisjon 1:

1. Estimering: Med estimering forstår vi at verdien som overveies, estimatet, representerer den nevnte verdien i nåtiden. Dessuten dannes estimatet ved å bruke en matematisk modell der den nevnte verdien justeres basert på historiske data (målinger og/eller prosesstilførsler) inntil nåtiden.
- 15 2. Prediksjon: Med prediksjon forstår vi at verdien som overveies, den/de predikerte verdien(e), representerer den/de framtidige nevnte verdien(e) framover i tida. Dessuten frambringes prediksjonen ved hjelp av en matematisk modell.

For å beskrive denne oppfinnelsen definerer vi følgende: Definisjon 2:

- 20 1. Prosessparametere: Prosessegenskaper som ikke varierer med tida (dimensjoner, entalpi m.m.)
2. Prosessvariabler: Prosessegenskaper som varierer med tida (badtemperaturen, aluminakonsentrasjonen, tykkelsen av sidebelegget m.m.)
3. Prosesstilstander: Et utvalg av prosessvariabler som kan beskrives med differensiallikninger (badtemperaturen, tykkelsen av sidebelegget m.m.)
- 25 4. Beregnede variabler: Et utvalg av prosessvariablene som beregnes ut fra andre prosessvariabler og/eller integrerte prosesstilstander. For eksempel er aluminakonsentrasjonen forholdet mellom massen av alumina i badet og massen av badet.
- 30 5. Målinger: Fysiske målinger av et utvalg av prosessvariablene.
6. Prosesstilførsler: Noe (her: energi og masse) som kan tilføres den fysiske prosessen ved å overføre prosessen fra en tilstand til en annen i løpet av et endelig tidsrom.

35 Vi vil også kombinere innholdet fra definisjon 1 og 2 for å omtale estimerte og predikerte prosessvariabler, estimerte og predikerte tilstander, estimerte og predikerte beregnede variabler og estimerte og predikerte målinger.

I NMPC innføres det en ikke-lineær modell av aluminaelektrolyseprosessen. Den (ikke-lineære) modellen har to viktige hensikter – én er å estimere den aktuelle verdien av viktige prosessvariabler og målinger i prosessen, den andre skal brukes til å predikere de framtidige verdiene av prosessvariabler og målinger (se figur 7, som forklares mer inngående nedenfor).

I denne foreslåtte NMPC for en aluminiumselektrolysecelle brukes det en dynamisk matematisk modell av elektrolyseprosessen til å estimere viktige prosessvariabler. Prosessvariablene kan være variabler som ikke måles i det hele tatt (tykkelsen av sidebelegget, massen av bad og metall, massen av AlF_3 , massen av Al_2O_3 , konsentrasjonen av Al_2O_3) og prosessvariabler som måles sjelden (konsentrasjonen av AlF_3 , badnivået, metallnivået og badtemperaturen). Felles for de modellerte prosessvariablene er at estimerer av prosessvariablene er tilgjengelig nesten kontinuerlig (for eksempel hvert 5. minutt).

Mens målingene som beskrives ovenfor i «den kjente teknikken» i beste fall brukes som inngang til en eller annen lineær enkeltsløyferregulator, brukes alle målingene i NMPC til å drive de estimerte prosessvariablene slik at det kan beregnes bedre estimerer av prosessvariablene. Metoden som brukes omtales i litteraturen som Kalman-filtrering, blant annet det lineære kalmanfilteret, det augmenterte kalmanfilteret, det utvidede kalmanfilteret, det augmenterte utvidede kalmanfilteret, sigmapunkt-/ikke-linearisert (unscented) kalmanfilter og ensemble-kalmanfilter. En annen tilnærming er å bruke estimering med glidende horisont (MHE), siden det håndterer de forsinkede målingene effektivt. For eksempel er resultatene av målingene av surheten vanligvis tilgjengelige noen timer etter den faktiske målingen. Med MHE plasseres målingen på rett sted i tidsvinduet og bidrar dermed til et mer korrekt nåtidsestimert.

Det er viktig å være klar over at estimerer som varierer over tid også er tilgjengelige mellom de sjeldne målingene.

NMPC bruker estimatet fra estimatoren som beskrives ovenfor som utgangspunkt (der vi er). Ved å sammenlikne estimatet med utvalgte ønskede verdier (dit vi vil) på et gitt sett prosessvariabler, beregner NMPC-regulatoren det framtidige reguleringsforløpet på en optimal måte ved å bruke modellen. 'Framtid' kunne være de neste 24 timene. Den første optimale reguleringen blir så brukt på den fysiske prosessen. Dette skjemaet blir så gjentatt hvert n-te minutt (n ennå ikke bestemt) (se Fig. 7).

- En hovedforskjell i forhold til «den kjente teknikken» er at inngang til regulatoren utelukkende er basert på estimerte verdier og ikke direkte på målte verdier. Dessuten utnytter regulatoren prosessens ikke-linearitet, forbindelsen mellom prosessvariablene, og prosessdynamikken sammen med prosess- og regulatorrestriksjoner, og finner en optimal inngang for prosessreguleringen, som brukes på den fysiske prosessen. Dessuten brukes NMPC i denne realiseringen til å beregne inngangen for prosessreguleringen direkte i stedet for noen ønskede verdier for sekundære reguleringsløyfer eller regulerings-systemer.
- 10 I en realisering av den foreliggende oppfinnelsen har den brukte modellen 9 estimerte prosesstilstander, 7 målinger, 3 hoved- og 10 tilleggsinnganger for prosessreguleringen og noen estimerte prosessparametere. Dessuten er det definert noen beregnede prosessvariabler.
- 15 De estimerte prosesstilstandene er tykkelsen av sidebelegget, badtemperaturen, massen av løst alumina i badet, massen av løst aluminiumfluorid i badet, metallmassen, avstanden mellom den nedre anodeoverflaten og katoden, katodetemperaturen, massen av aluminaslamm og massen av kryolitt i cellen.
- 20 Målingene er den tilsynelatende motstanden, linjestrømmen, badtemperaturen, konsentrasjonen av aluminiumfluorid, metallnivået, badnivået og temperaturen i katodestengene.
- 25 De 3 viktigste prosessreguleringsinngangene er tilførsel av alumina og aluminiumfluorid og anodebevegelsen. De 10 andre prosessreguleringsinngangene er opplysninger om de diskrete hendelsene skifting av anoder, tapping av metall, tilførsel/fjerning av bad, skorpedekke, hvordan skorpen er dekket med alumina, tilførsel av soda, skorpebryting, anodeeffekt og anodeproblemer.
- 30 Den estimerte parameteren kan være en hvilken som helst, en eller flere, av parameterne som trengs for å beskrive en aluminiumselektrolysecelle, men i den foreliggende realiseringen av oppfinnelsen estimeres bare varmetapet gjennom. De andre parameterne regnes som kjente og konstante.
- 35

De viktigste beregnede variablene er massen av bad, aluminakonsentrasjonen, surheten, den tilsynelatende motstanden, likvidustemperaturen, overhetingsvarmen og anodekatodeavstanden.

- 5 I forbindelse med Kalman-filtrering regnes usikkerheten for de estimerte prosessstilstandene og målingene for å være gaussisk og additiv. Usikkerheten i reguleringsinngangene regnes for å være gaussisk og relativ.

NMPC-regulatoren:

- 10 NMPC-regulatoren brukes til å regulere aluminiumselektrolysecellen, og målet er å regulere energi- og massebalansen. Siden det ikke foreligger mer enn tre prosessinnganger (tilførsel av alumina, tilførsel av aluminiumfluorid og anodebevegelser), kan man ikke vente å regulere mer enn tre prosessvariabler til en ønsket verdi. I NMPC-sammenheng betegnes prosessinngangene som manipulerede variabler (MV).

15

En av utfordringene er da å velge hvilke tre prosessvariabler som gjør en best i stand til å regulere masse- og energibalansen. I denne realiseringen av den foreliggende oppfinnelsen velges de følgende tre prosessvariablene: aluminakonsentrasjonen, badtemperaturen og tykkelsen av sidebelegget. Disse prosessvariablene betegnes som regulerte variabler eller RV, og er et utvalg av alle prosessvariablene. Dessuten forbindes de tre nevnte prosessvariablene med en referanseverdi (eller ønsket verdi).

20

I tillegg til disse prosessvariablene er også massen av fluorid i badet, anodekatodeavstanden (ACD) og overhetingsvarmen inkludert i RV, men uten referanseverdier.

25

De antas imidlertid å ha en verdi mellom visse bestemte minimums- og maksimumsgrenser (se tabell 3). Det er også viktig å merke seg at den tilsynelatende motstanden ikke har noen egen referanseverdi i denne realiseringen av oppfinnelsen. NMPC tillates å bruke den verdien for motstanden som er nødvendig for å opprettholde energibalansen.

30

Tanken bak valget av disse prosessvariablene som RV er at så snart aluminakonsentrasjonen, badtemperaturen og tykkelsen av sidebelegget er bestemt, er overopphetinga også bestemt. Når overopphetinga er bestemt, er likvidustemperaturen bestemt og med den massen av fluorid. Dessuten inkluderes ACD i RV for å gi anledning til å begrense ACD av sikkerhetsgrunner. For eksempel regnes det som et alvorlig sikkerhetsproblem hvis anodene skulle komme opp av badet (høy ACD).

35

Som beskrevet ovenfor er utgangen fra kalmanfilteret det beste estimatet av den nåværende tilstanden av prosessvariablene, og den brukes av NMPC til å definere et utgangspunkt for de kommende beregningene. NMPC beregner et optimalt framtidig prosessinnangsscenario $U(t_k), U(t_{k+1}), \dots, U(t_{k+N_u})$ for å oppnå ønskede verdier for reguleringsvariablene innen en valgt framtidig diskret tid av lengde N (prediksjonshorisont). Her er t_k nåtid og $t_{k+1}, \dots, t_{k+N_u}$ er den framtidige diskrete tiden i reguleringshorisonten. N_u er lengden av en reguleringshorisont, der $N_u \leq N$. Intervallet t_k til t_{k+N} danner prediksjonsvinduet. Men bare den første beregnede prosessinngangen $U(t_k)$ fra det optimale framtidige prosessinnangsscenariet brukes på den fysiske prosessen selv. Dette skjemaet blir så gjentatt for eksempel hvert 5. minutt.

Siden prosessvariablene og målingene ikke kan måles på forhånd eller framover i tid, brukes det en modell av prosessen til å predikere det framtidige forløpet av prosessen. Prediksjonsmodellen som brukes i denne oppfinnelsen er den samme modellen som brukes i estimatoren som er beskrevet ovenfor, men nå uten mulighet for å oppdatere tilstandsestimatene med målinger.

For å oppnå den optimale framtidige inngangssekvensen (U), defineres det et kriterium som skal minimaliseres. Kriteriet eller kostfunksjonen, J , som skal minimaliseres av optimalisatoren i NMPC, kan i allmennhet være en hvilken som helst funksjon, men er vanligvis noe slikt som

$$J = f(Z, Z_{ref}, W, U, \Delta U, restriksjoner) \quad (5)$$

der Z er den framtidige prediksjonen av de regulerede variablene (RV), Z_{ref} er de ønskede verdiene av Z , U er det framtidige prosessinnangsscenariet, ΔU er differansen mellom nåværende og tidligere prosessinnangsscenario og W er noen vektmatriser eller funksjoner som brukes til å vekte kombinasjoner av Z , Z_{ref} , U og/eller ΔU (se mer inngående forklaring nedenfor). Termen *restriksjoner* står for fremgangsmåter for håndtering av brudd på restriksjonene.

I én realisering av oppfinnelsen defineres kriteriet som skal minimaliseres som

$$J' = \frac{1}{2}(Z - Z_{ref})^T Q(Z - Z_{ref}) + \frac{1}{2}\Delta U^T S\Delta U + restriksjoner \quad (6)$$

I likning (6) står T for den transponerte størrelsen. Vektoren Z er sammensatt av den framtidige prediksjonen av de regulerte variablene (RV). $Z-Z_{ref}$ står for avviket. Vektoren U er det framtidige inngangsscenariet for alle manipulerede variabler (MV), mens ΔU er forskjellen mellom nåværende og forrige inngangsscenario.

5

Q og S i likning (6) er alle positive, semidefinitte og diagonale matriser, d.v.s. at de inneholder bare vekter som er positive eller null. I forbindelse med likning (5) kan Q og S regnes som inkorporert i W .

- 10 Hensikten med vektmatrisen Q er å regulere oppførselen til NMPC-regulatoren. Det er åpenbart at ved å øke vektene i Q , vil man øke viktigheten av å regulere den regulerte variabelen til den ønskede verdien og dermed redusere avviket fra den ønskede verdien. Prioriteten mellom de forskjellige regulerte variablene reguleres ved å velge forskjellige vekter for dem. I denne prosessen er det viktigst å oppnå den ønskede
- 15 aluminakonsentrasjonen, deretter badtemperaturen og til slutt tykkelsen av sidebelegget. Dette gjenspeiles i Q -matrisen med en høy verdi i Q for aluminakonsentrasjonen, lavere for badtemperaturen og lavest for tykkelsen av sidebelegget (se tabell 3).

- Termen S i likning (6) regulerer kostnaden ved bruk av prosessstilførselene. Hvis vektene i
- 20 S økes, vil det undertrykke bruk av den manipulerede verdien og den vil bli mindre brukt. For eksempel, med henvisning til tabell 2 nedenfor, er det billig å bruke alumina, litt dyrere å bruke anodebevegelser og svært kostbart å bruke aluminiumfluorid til å oppnå de ønskede verdiene.

- 25 En utfordring med NMPC er at hvis prediksjonshorisonten er lang, kan regnebyrden bli svært høy, og man får ikke noen garanti for at en optimal løsning er tilgjengelig ved behov. For å redusere regnebyrden drastisk kan man parametrisere punktene der den regulerte variabelen evalueres mot referanseverdiene og også parametrisere prosess-inngangsscenariet. Sistnevnte betegnes som inngangsblokkering.

30

- I denne realiseringen av oppfinnelsen brukes det en prediksjonshorisont på 12 timer. Med 5 minutters prøvetakingsintervall og tre manipulerede variabler kunne man hatt $144 \times 3 = 432$ MV-verdier å beregne for prediksjonshorisonten. Ved å si at tilførselsverdien bare kan endre seg ved utvalgte prøvenummer i prediksjonshorisonten og regnes som konstant
- 35 (blokkert) mellom dem, reduseres størrelsen av optimaliseringsproblemet drastisk. Denne metoden kalles for 'tilførselsblokkering'. Se også tabell 1 for flere opplysninger. I denne

oppfinnelsen forenkles problemet fra beregning av 432 MV-verdier til beregning av 13 for den utvalgte prediksjonshorisonen.

5 Tabellen nedenfor viser de framtidige prøvetakingstidene når det beregnes en ny reguleringsverdi. Reguleringsverdiene holdes konstant (blokkert) mellom disse prøvetakingstidene. På grunn av høy regnebyrde beregnes ikke reguleringsverdiene for hver prøve i framtid (tilførselsblokkering), men resultatet er en god tilnærming.

Tabell 1: Tilførselsblokkering – utvalgte prøver

Nr	Tilførsel	Type	Valgte prøver (prøvenummer 143)
1	Alumina, råstoff	Tilbakemelding	0, 4, 10, 24, 48, 96
2	Aluminiumfluorid, råstoff	Tilbakemelding	0, 72
3	Anodebevegelser for MPC	Tilbakemelding	0, 12, 24, 48, 96

10

I denne realiseringen av oppfinnelsen velges punktene der den regulerede variabelen evalueres fritt mot referansen (se tabell 4). Parametriseringen av inngangsscenarioet kan velges individuelt for hver MV (se figur 7).

15

Dessuten har man muligheten for å sette en grense for Z , U og ΔU . I likning (6) står «restriksjoner» for handlingen når tilstander og/eller tilførsel bryter maksimums- eller minimumsverdiene.

20

Psevdokoden for algoritmen blir

Repeter: (typisk hvert 5. minutt)

25

Estimer de gjeldende prosessvariablene basert på oppdaterte målinger og reguleringsinngang.

Trekk ut den regulerede variabelen fra estimatet (figur 5).

Beregn optimalt framtidig prosessinngangsscenario $U(t_k, t_{k+1}, \dots, t_{k+n})$ etter kriteriet J'

Bruk bare $U(t_k)$ på den fysiske prosessen

$k=k+1$

30

Repetisjon slutt

Algoritmen er også illustrert på figur 4 til 7.

Figur 4 illustrerer at ved tid t_k (nåtid) foreligger det et nytt, oppdatert estimat av de regulerte variablene. Det oppdaterte estimatet for de regulerte variablene er et utvalg fra estimatet av prosessvariablene. Estimatet av prosessvariablene er utgangen fra estimatoren (kalmanfilter). Z_{ref} er ønsket verdi for den regulerte variabelen. MV er de manipulerte variablene som definert ovenfor.

Figur 7 illustrerer at ved tid t_k (nåtid) beregnes det framtidige optimale inngangsscenariet for prosessreguleringen for det definerte prediksjonsvinduet. Bare $U(t_k)$, den første kombinasjonen av prosessinnganger for det optimale inngangsscenariet for prosessreguleringen, brukes på den fysiske prosessen. Det nåværende estimatet av prosessvariablene danner utgangspunkt for å predikere det framtidige forløpet av prosessen. Den predikerte RV er et utvidet utvalg av det predikerte tidsforløpet av prosessvariablene som fås fra prediksjonsmodellen. Figuren illustrerer også reguleringshorisonten og prediksjonshorisonten. Reguleringshorisonten kan være mindre enn eller lik prediksjonshorisonten. Reguleringshorisonten stammer fra de tilfellene der det brukes tilførselsblokkering. Når reguleringshorisonten i et slikt tilfelle er mindre enn prediksjonshorisonten, antas det at den framtidige optimale inngangsverdien for prosessreguleringen i intervallet t_{k+N_u+1} til t_{k+N} er lik $U(t_{k+N_u})$.

Figur 6 illustrerer at ved tid t_k (nåtid) foreligger det et nytt, oppdatert og korrigert estimat av de regulerte variablene basert på nye målinger og inngang.

Figur 7 illustrerer at ved tid t_k (nåtid) beregnes det en ny framtidig optimal inngangssekvens for prediksjonsvinduet basert på den nye, oppdaterte reguleringsvariabelen. Bare $U(t_k)$, den første kombinasjonen av prosessinnganger for den optimale framtidige inngangssekvensen, brukes på den fysiske prosessen. Den oppdaterte predikerte reguleringsvariabelen er et utvalg fra det predikerte tidsforløpet til prosessvariablene som fås fra prediksjonsmodellen. De prikkede linjene er fra den siste prøven. Gjenta deretter fra Fig. 6.

Tabellen nedenfor viser innstilling av parameterne for de manipulerede verdiene i optimaliseringskriteriet:

Tabell 2: Parameterinnstilling for de manipulerede variablene

Nr	Tilførsel	Type	UMin	uMaks	duMaks	S
1	Alumina, råstoff	Tilbakemelding	0	12	1,5	0,1
2	Aluminiumfluorid, råstoff	Tilbakemelding	0	1,36	1,36	1800
3	Anodebevegelser for MPC	Tilbakemelding	-20	20	8	20

5 Tabellen nedenfor viser innstilling av parametrene for reguleringsvariablene i optimaliseringskriteriet:

Tabell 3: Parameterinnstilling for reguleringsvariablene

Nr	Variabelnavn	Z _{min}	Z _{maks}	Q	Ønsket verdi
1	Aluminakonsentrasjon	2,3	4,5	250	3,0
2	Badtemperatur	952	970	10	958,0
3	Tykkelsen av sidebelegget	20	160	0,4	100,0
4	Masse av fluorid	500	1600	0	-
5	Anode-katodeavstand	0,02	0,04	0	-
6	Overhetingsvarme	3,0	15,0	0	-

10 Den valgte prediksjonshorizonten er typisk 12 timer. Dette har vist seg å gi gode resultater både på simulatoren og under prosesslinjetester. Denne horisonten er lang nok til at de fleste variablene har stabilisert seg i slutten av den.

15 De forskjellige regulerede variablene har forskjellig stabiliseringstid og blir derfor innstilt forskjellig i prediksjonshorizonten. Regulatoren innstilles slik at den tilførte aluminaen hovedsakelig regulerer aluminakonsentrasjonen. Anodebevegelsen regulerer hovedsakelig temperaturen og tilførsel av aluminiumfluorid regulerer hovedsakelig tykkelsen av sidebelegget. Men til tross for denne innstillingen tas interaksjoner og samvirke mellom variabler også med i betraktningen.

20

Tabellen nedenfor viser ved hvilke prøvetakingstider verdien av hver utgangsvariabel (RV) tas i betraktning i optimaliseringskriteriet.

Tabell 4: Parametrisering av reguleringsvariablene

Nr	Variabelnavn	Aktive prøver
1	Aluminakonsentrasjon	3:6:144
2	Badtemperatur	24:6:144
3	Tykkelsen av sidebelegget	48:6:144
4	Massen av fluorid	12:6:144
5	Anode-katodeavstand	12:6:144
6	Overhetingsvarme	12:6:144

Her betyr 3:6:144 at den første valgte verdien er prøve nr. 3, så hver 6. opp til prøve nr. 144 (12 timer). Tanken bak parametriseringen er at RV ikke forandrer seg fortere enn at prosessdynamikken fanges opp i parametriseringen. Dermed brukes det et utvalg av prøvetakingstidene og dette reduserer programmets behov for hukommelse.

Det må være klart at den ovennevnte realiseringen ikke er uttømmende. Andre estimerte prosesstilstander, perioder, intervaller, viktig reguleringsinngang, annen reguleringsinngang, estimerte prosessparametere og beregnede prosessvariabler enn de som er nevnt, kan også realiseres i samsvar med den foreliggende oppfinnelsen. Dette kan bli realisert ved hjelp av nye målemetoder, eller med mer avanserte måter å modellere cellens oppførsel på.

For eksempel kan det brukes nye typer målinger, som varmetap fra toppen, kontakt skorpebryter-bad, automatiske målinger av badtemperaturen og automatiske målinger av bad- og metallnivået for å forbedre ytelsen til estimatoren og dermed ytelsen til regulatoren.

Også varmetap gjennom sidene kan brukes som en aktiv reguleringsinngang ved hjelp av varmevekslere som brukes til energigjenvinning.

Dessuten kan man modellere og kompensere for noen framtidige aktiviteter. Ved for eksempel å modellere anodeendringen og metalltappingen, kan innvirkningen på prosessen predikeres innen prediksjonshorisonten, og dermed kompenseres for.

Videre kan regulatoren bygges inn i både desentraliserte og sentraliserte regulerings-systemarkitekturer der den nevnte datamaskinen vil ha et program spesielt for hver oven eller elektrolysecelle på grunn av den individuelle karakteren til de nevnte cellene.

NMPC kunne brukes til å regulere hele anlegget hvis den dynamiske strømbelastningen er av betydning.

Den ønskede verdien kunne optimaliseres slik at hele anlegget (alle cellene) kunne kjøres optimalt for å senke strømforbruket i definerte perioder av dagen.

Patentkrav

- 5 1. Fremgangsmåte for å regulere en elektrolysecelle for aluminiumsproduksjon ved hjelp av prosessreguleringsinngang, som innbefatter å måle en eller flere prosessvariabler der måleverdien(e) føres til en estimator for å estimere den nåværende verdien av en eller flere prosessvariabler og deretter predikere verdien av nevnte prosessvariabel/-variabler og/eller en annen prosessvariabel/andre prosessvariabler i framtid, der nevnte predikerte verdi(er) brukes til å beregne
- 10 framtidige scenarier for reguleringsinngangen, karakterisert ved at verdien(e) av prosessvariabelen(-variablene) predikeres etter en ikke-lineær dynamisk modell.
- 15 2. Fremgangsmåte i henhold til krav 1, karakterisert ved at en prosessreguleringsinngang dirigeres til cellen i tidsintervaller der perioden T tilfredsstiller $0 < T < \infty$.
- 20 3. Fremgangsmåte i henhold til krav 1, karakterisert ved at framtidige scenarier for reguleringsinngangen beregnes i tidsintervaller der perioden T tilfredsstiller $0 < T < \infty$.
- 25 4. Fremgangsmåte i henhold til krav 1, karakterisert ved at framtidige scenarier for reguleringsinngangen beregnes i henhold til den følgende kostfunksjonen, likning J:
- 30
$$J = f(Z, Z_{ref}, W, U, \Delta U, \text{begrensninger})$$
- der
- Z er den framtidige prediksjonen av de regulerte variablene (RV),
 Z_{ref} er de ønskede verdiene eller referanseverdiene for Z ,
 U er det framtidige prosessinngangsscenariet,
- 35 ΔU er forskjellen mellom det nåværende og det foregående prosessinngangsscenariet,

W er vektmatriser eller vektfunksjoner som brukes til å vekte kombinasjoner av Z , Z_{ref} , U og/eller ΔU ,
og termen *restriksjoner* står for fremgangsmåter for å håndtere brudd på restriksjonene.

5

5. Fremgangsmåte i henhold til krav 1,
karakterisert ved at
beregningen av framtidige sekvenser for reguleringsinngangen utføres i henhold til den følgende kostfunksjonslikningen J' :

$$10 \quad J' = \frac{1}{2} (Z - Z_{ref})^T Q (Z - Z_{ref}) + \frac{1}{2} \Delta U^T S \Delta U + \text{restriksjoner}$$

der T er den transponerte størrelsen,

Z er en vektor som består av den framtidige prediksjonen av de regulerte variablene (RV),

$Z - Z_{ref}$ står for avviket,

15

U er en vektor som forholder seg til det framtidige inngangsscenariet for alle manipulerede variabler (MV),

ΔU er differansen mellom nåværende og foregående inngangsscenario,

20

Q og S er positive semidefinitte og diagonale matriser, d.v.s. de inneholder bare vektorer som er positive eller null.

6. Fremgangsmåte i henhold til krav 1,
karakterisert ved at modellen sammenlikner estimerte nåværende verdi(er) av prosessvariabel(-variabler) med utvalgte ønskede verdier for et gitt sett prosessvariabler.

25

7. Fremgangsmåte i henhold til krav 1,
karakterisert ved at
estimeringen gjøres med Kalman-filtermetoder.

30

8. Fremgangsmåte i henhold til krav 1,
karakterisert ved at
estimeringen gjøres etter prinsippet med glidende horisont.

9. Fremgangsmåte i henhold til krav 1,
karakterisert ved at
prosessvariabelen er aluminakonsentrasjonen.

35

- 5 10. Fremgangsmåte i henhold til krav 1,
karakterisert ved at
prosessvariabelen er badtemperaturen.
- 10 11. Fremgangsmåte i henhold til krav 1,
karakterisert ved at
prosessvariabelen er tykkelsen av sidebelegget.
- 15 12. Anordning for å regulere en elektrolysecelle for aluminiumsproduksjon ved
prosessreguleringsinngang, som omfatter midler for å måle en eller flere
prosessvariabler, der målte verdi(er) føres til en estimator for å estimere den
nåværende verdien av en eller flere prosessvariabler og deretter predikere verdien
20 av nevnte prosessvariabel(-variabler) og/eller en annen prosessvariabel/andre
prosessvariabler, der nevnte predikerte verdi(er) brukes til å beregne et framtidig
scenario for reguleringsinngangen ved hjelp av en kalkulator,
karakterisert ved at
verdien(e) av prosessvariabelen(-variablene) predikeres etter en ikke-lineær
dynamisk modell.
- 25 13. Anordning i henhold til krav 12,
karakterisert ved at
estimatoren er et Kalman-filter.
- 30 14. Anordning i henhold til krav 12,
karakterisert ved at
det prosessregulerende middel er en enhetlig del av en lokal ovnsregulator.
- 35 15. Anordning i henhold til krav 12,
karakterisert ved at
det prosessregulerende middel er en enhetlig del av en sentral regulator.
16. Anordning i henhold til krav 15,
karakterisert ved at
det prosessregulerende middel har egen programvare for hver individuelle ovn
(celle).

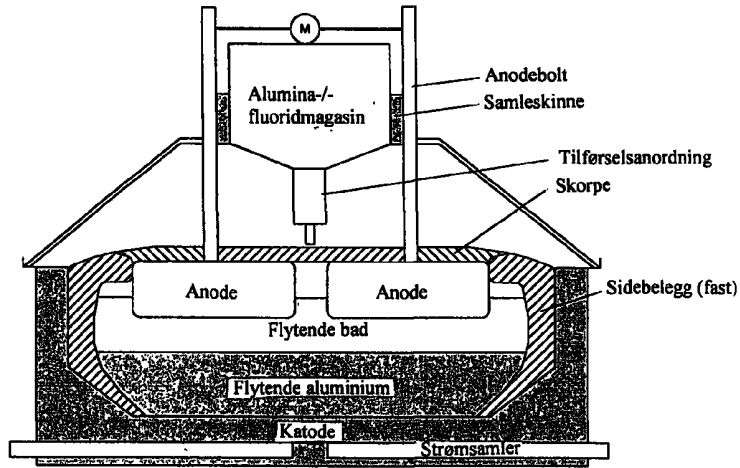


Fig. 1

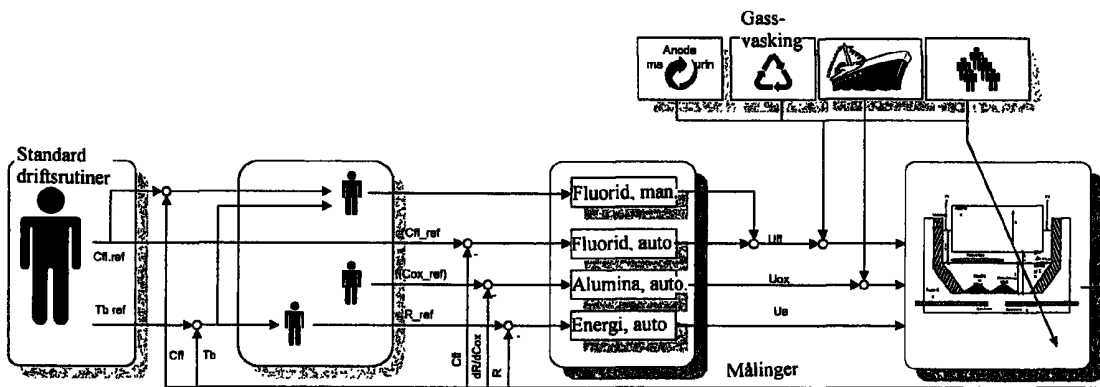


Fig. 2

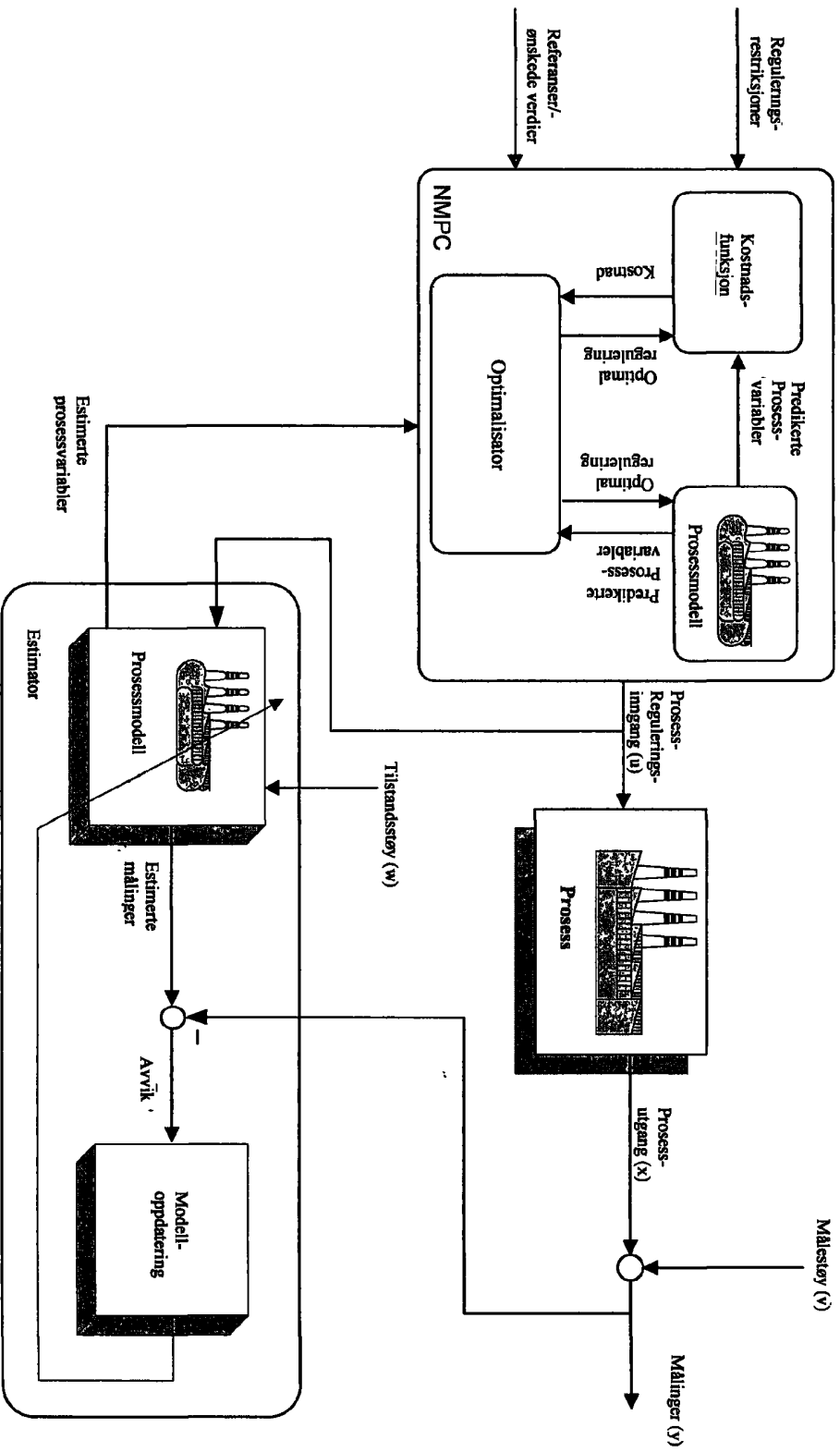


Fig. 3

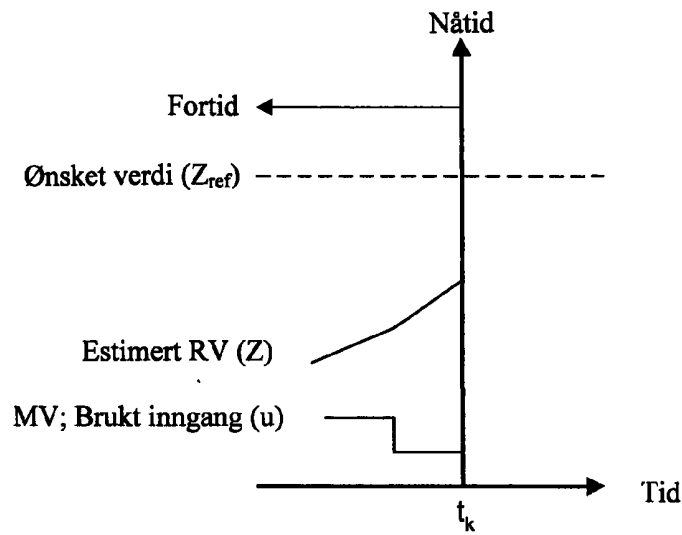


Fig. 4

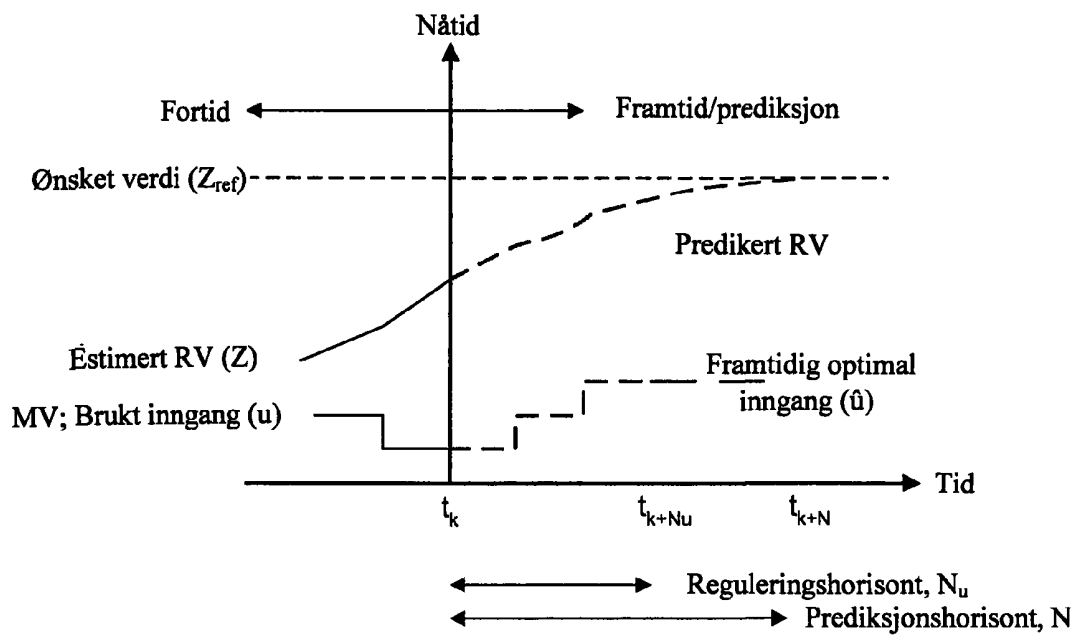


Fig. 5

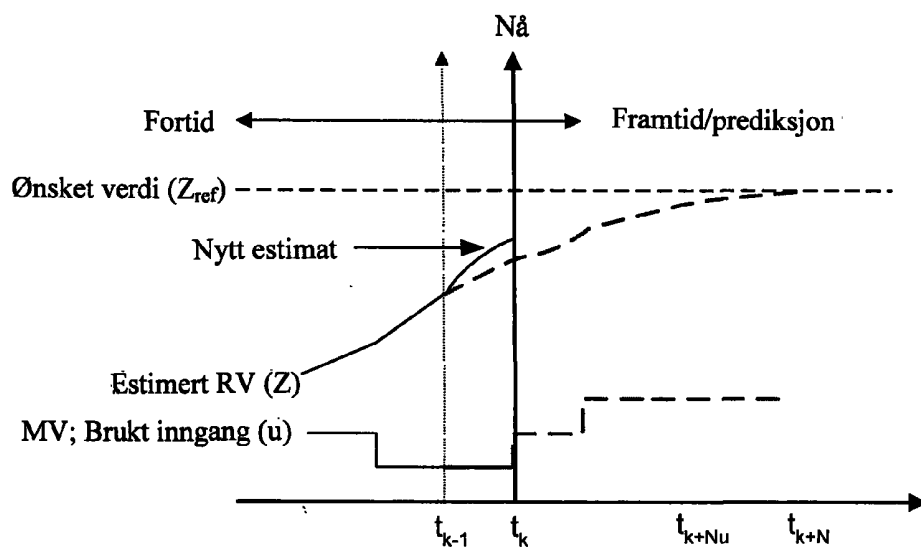


Fig 6

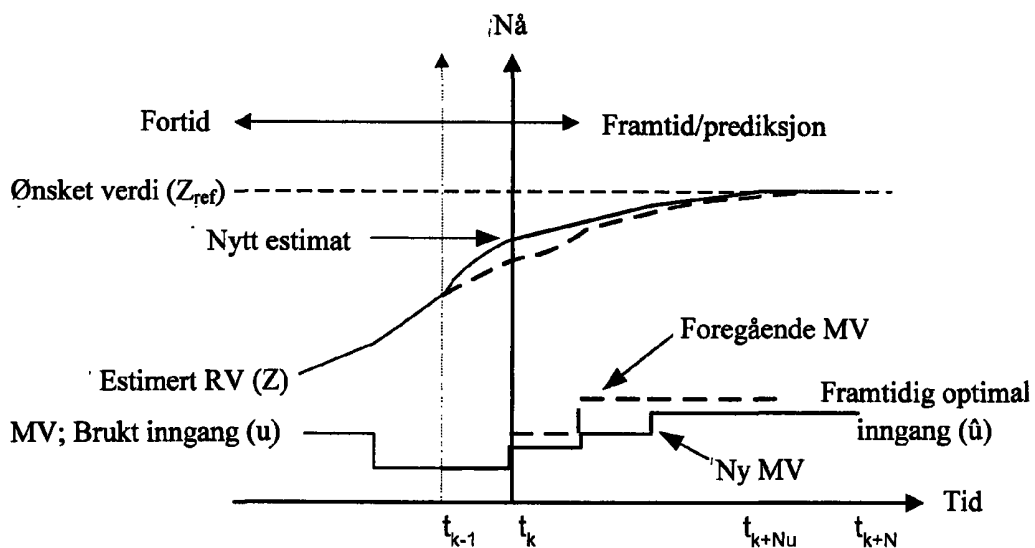


Fig. 7