

Bilagsrapport til READY:

VPP Styring

Indhold: 13 sider

Esben Holm, Neogrid Technologies ApS

3. december 2014

Indhold

Indhold	i
Indledning	1
1 Varmepumpe VPP	2
1.1 Estimator	2
1.2 Afvikling af styring	3
2 Systemanalyse	4
2.1 Puljedata	4
2.2 Analyse	5
3 Regulator	7
3.1 Tilbageføringsregulator	8
3.2 Blokdiagram	9
4 Overføringsfunktion	10
4.1 Analytisk tuning	10
5 Konklusion	13

Indledning

Denne bilagsrapport er udarbejdet som en del af READY-projektet. Målet for projektet var bl.a. at teste styring af en pulje af varmepumper, kombineret i et Virtuelt Kraftværk (VPP)¹.

READY-projektet var støttet af ForskEL, som er PSO-midler administreret af Energinet.dk. Projektpartnerne i READY var:

- Ea Energianalyse
- Neas Energy
- Neogrid Technologies
- PlanEnergi
- Aalborg Universitet
- Aarhus Universitet

Fokus for denne bilagsrapport er en gennemgang af de væsentligste tekniske aspekter for at kunne designe en regulator til det VPP. For mere baggrundsviden om READY-projektet henvises til slutrapporten.

Som led i READY-projektet har Neogrid haft til opgave at implementere og teste den tekniske del af at styre et VPP. Det VPP består af en pulje af varmepumper, der er blevet opgraderet til at kunne fjernstyres. Det er varmepumper der allerede har været installeret hos den individuelle husstand, som har fået installeret måleudstyr og et relæ som kan kommunikeres med over internet. Relæet giver mulighed for at tænde og slukke varmepumpen. Om den rent faktisk kører når den er tændt kan ikke styres direkte med opsætningen i READY.

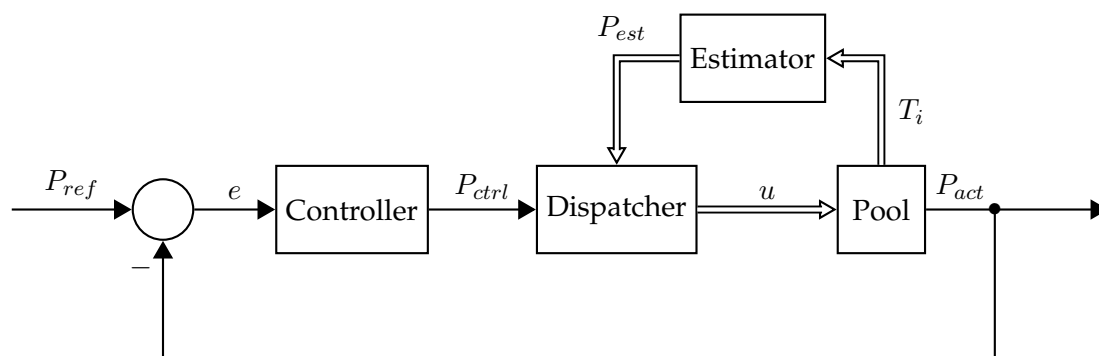
Denne bilagsrapport tager udgangspunkt i en overordnet beskrivelse af hvordan styringen af varmepumperne er implementeret. Der er gået flere overvejelser ind i hvilke begrænsninger det har været nødvendigt at stille op, samt de der allerede er ved puljestyring. Resultaterne af disse overvejelser er taget for givet.

Derefter gennemgås en analyse af responsen af puljen af varmepumper. Analysen munder ud i en forsimplet model, der kan bruges til at designe reguleringen efter.

¹Virtual Power Plant (VPP)

1 Varmepumpe VPP

Den overordnede struktur af det VPP er vist i blokdiagrammet på figur 1. Den ønskede effekt for puljen af varmepumper er P_{ref} . Denne bliver overholdt ved hjælp af regulatoren (controller) der bruger måling på effekten P_{act} til at bestemme styringssignalet P_{ctrl} . Selve afviklingen af styringssignalet sker ved at omregne effekten P_{ctrl} til et antal af varmepumper, som skal være tændt. Dette bliver sendt som en række af tænd/sluk signaler u ud til varmepumperne i puljen. Hvor mange varmepumper der skal tændes, for at bruge den ønskede effekt er udregnet ud fra den estimerede effekt P_{est} . Estimatoren bruger målinger på indetemperaturen i rummet T_i til at estimere effekten.



Figur 1: Overordnet blokdiagram af VPP

1.1 Estimator

Ved start af hver cyklus trækkes målinger på hver varmepumpe ind fra databasen, bl.a. indetemperaturen T_i og den målte effekt P_{act} . Som nævnt bliver effektmålingerne brugt i feedbacksløjfen til at udregne den aktuelle fejl, som regulatoren kan give et styresignal efter.

Temperaturmålingerne bliver brugt til at estimere den reelle effekt, som varmepumpen vil trække, hvis den fik lov til at være køre. Dette giver et mere eller mindre korrekt tal på hvor mange kW der forventes at blive brugt ved at tænde det valgte antal varmepumper.

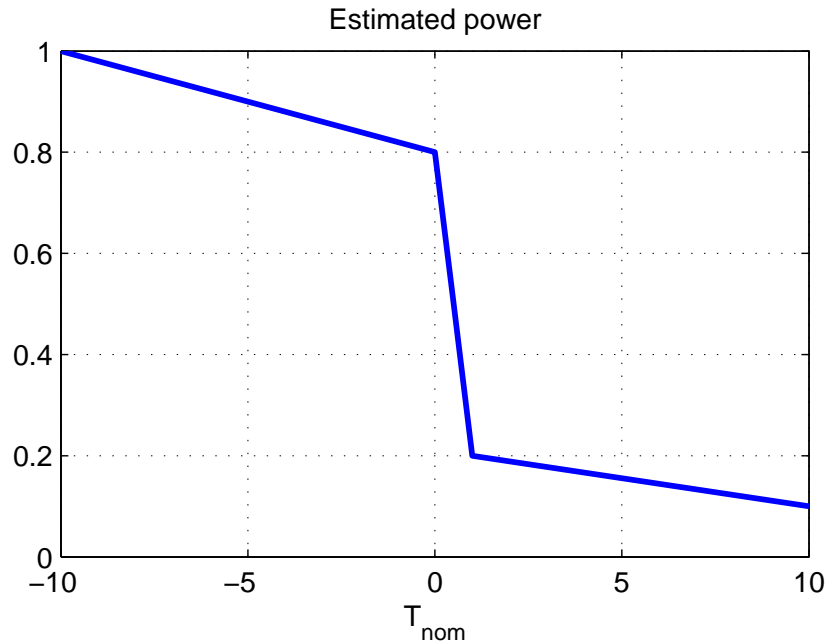
For at kunne sammenholde den målte temperaturen med det ønskede temperaturvindu udregnes en normeret temperatur, hvor T_L er den nedre grænse for indetemperaturen og T_H ligeledes er den øvre grænse².

$$T_{nom} = \frac{T_i - T_L}{T_H - T_L}$$

Når den maksimale effekt for hver varmepumpe er kendt, kan den brugte effekt estimeres ud fra funktionen vist på figur 2 der afhænger af T_{nom} . Dette giver et tal for effekten hver varmepumpe vil bruge hvis den er tændt.

$$P_{est} = f(T_{nom}) \cdot P_{max}$$

²Vinduet er på ± 2 °C ($T_H - T_L = 4$).



Figur 2: Funktion der estimerer effekten P_{est} som funktion af T_{nom} for hver varmepumpe. Effekten er taget ift. den maksimale effekt for hver varmepumpe.

1.2 Afvikling af styring

For hver kørsel af VPP sløjfen, bliver det kontrolleret hvilke varmepumper der skal blive kørende. De er tændte og låste. De kan ikke slukkes og udgør derfor den minimale effekt \check{P}_{est} som bliver trukket af puljen af varmepumper.

Der er seks begrænsninger som tilsidesætter regulatorens styring. Enten på kørsel-/hviletid, for at der ikke bliver tændt og slukket hele tiden, eller på varmebehov, for at komforten ikke bliver kompromitteret.

1. Minimum hviletid - varmepumpen er slukket i et hviletids minimum (30 min).
2. Minimum kørselstid - varmepumpen er tændt i et kørselstids minimum (45 min).
3. Indetemperatur - temperaturen T_i kommer ikke mere end 2 °C under sætpunktet ($T_i > T_L \approx 20$ °C).
4. Maksimum hviletid - varmepumpen er ikke slukket længere end den maksimale hviletid (120-240 min).
5. Varmtvandstemperatur - temperaturen i varmtvandsbeholderen når ikke under sætpunktet (≈ 40 °C).
6. Varmtvandsbeholdning - Er der brugt mere vand end komfortgrænsen siden sluk, bliver varmepumpen tændt (30 L).

Ved afviklingen af styresignalet P_{ctrl} bliver varmepumperne sorteret efter den nominelle temperatur i rummet $T_{nom,r}$ hvor de koldeste bliver tændt først. Der udregnes hvor meget effekt der mangler ud fra $\check{P}_{est,r}$ hvorefter der bliver tændt for det passende antal varmepumper, startende med den koldeste indtil der menes at være nok effektforbrug. Dette er vist i algoritme 1.

Efter algoritmen er eksekveret, er P_{miss} et tal på hvor meget effekt der estimeres at mangle eller at være for meget i VPPet. Negativ P_{miss} er overskydende effekt, mens positiv er den manglende effekt, da der ikke kunne tændes for tilstrækkeligt mange varmepumper.

```

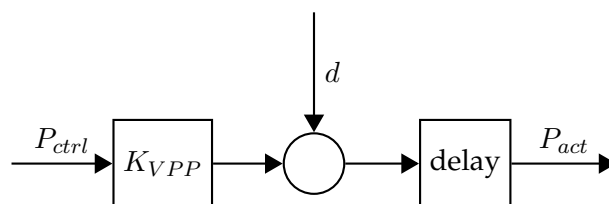
Input:  $P_{est}$  for hver VP og  $P_{ctrl}$ 
Output:  $P_{miss}$ 
 $\check{P}_{est} = P_{est}([l\ddot{a}ste \ \& \ t\ddot{a}ndte \ VPer]);$ 
 $P_{miss} = P_{ctrl} - \check{P}_{est};$ 
 $P_{miss\_start} = P_{miss};$ 
if  $P_{miss\_start} > 0$  then
  for  $n = ul\ddot{a}ste \ VPer$  sorteret efter  $T_{nom}$  do
    if  $P_{miss} > 0$  then
       $t\ddot{a}nd \ VP(n);$ 
       $P_{miss} = P_{miss} + P_{est}(n);$ 
    else
       $sluk \ VP(n);$ 
    end
  end
else
  for  $n = ul\ddot{a}ste \ VPer$  do
     $sluk \ VP(n);$ 
  end
end

```

Algorithm 1: Afvikling af styring. (VP står for varmepumpe.)

2 Systemanalyse

For at kunne lave fornuftig regulering af det fysiske system, er det nødvendigt at have en (forsimpler) model, der tilnærmelsesvist efterligner virkeligheden. På figur 3 er vist et blokdiagram over hvordan systemet er antaget at kunne forsimples til for at kunne behandle data til at sige noget generelt om systemet, nemlig dc-gain K_{VPP} og størrelse på 'forstyrrelse' d . Med forstyrrelse menes der en uforudsigelighed i udgangen af systemet, altså på effektforbruget.



Figur 3: Simple model af puljen af varmepumper. Forsinkelsen (delay) antages at være på én sample svarende til $T = 5$ min. (I z-planet skrives dette som z^{-1}).

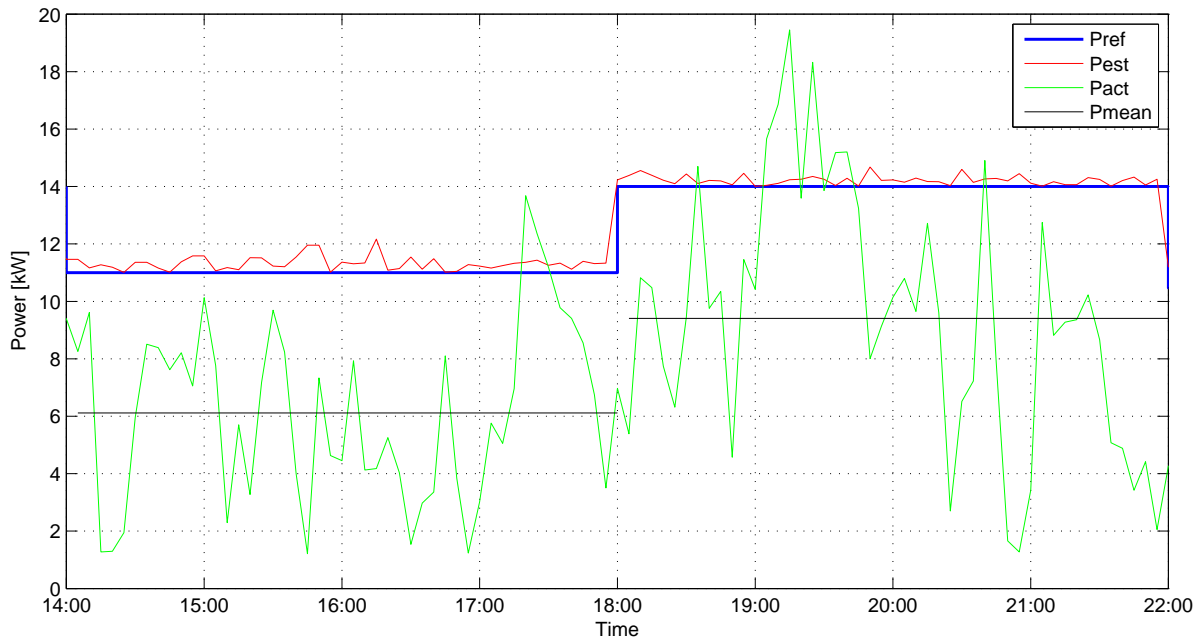
2.1 Puljedata

For at bygge modellen er det nødvendigt at kende K_{VPP} og d . For at finde det skal regulatoren sættes ud af funktion i VPP sløjfen i Matlab, mens referencen holdes konstant henover nogle timer. Den skal være konstant længe nok til at det er sikkert at puljen har nået en stabil tilstand,

så stabil som det bliver når der er store udsving i effekten. Regulatoren blev sat ud af funktion ved at $P_{ctrl} = P_{ref}$.

En reference på 11 kW blev givet fra 7. juli 2014 14:00 - 17:55 og en reference på 14 kW fra 18:00 - 21:55. På figur 4 er effektreferencen og den målte effekt vist, sammen med den estimerede effekt P_{est} . Ud fra P_{est} vises det at puljen ikke løber ind i komfortgrænser under analysen - der kan både tændes og slukkes varmepumper.

Dog bliver referencen ikke nået, hvilket viser at estimatoren ikke er tilstrækkelig til at styre puljen. På figuren vises hvordan systemet kører blot ud fra estimeringen, der er gjort på baggrund af rumtemperatursmålinger. Der bliver ikke taget højde for den aktuelle effekt P_{act} , eller andre målinger på varmepumpen.



Figur 4: Reference P_{ref} , målt effekt P_{act} og estimeret effekt P_{est} uden styring for tidsrummet 7. juli 2014 14:00 - 22:00.

2.2 Analyse

Fra data er det ikke muligt at bestemme nogen tidskonstant fra at referencen bliver sendt til varmepumperne til at effekten har ændret sig. Det kommer formentlig af at effekten har udviklet sig fuldt ud inden næste måling bliver taget fem minutter efter, eller at der i hvert fald ikke er nok målinger imellem det sker til at kunne aflede noget transient led i responsen. Det stemmer altså overens med den simple model, der blev vist i blokdiagrammet i figur 3.

Forstærkningen K_{VPP} kan findes ved at tage midleffekten henover timerne med konstant reference og sammenholde med den. Tidsvinduerne er valgt til at være mellem hhv. 14:05-18:00 og 18:05-22:00 for at være sikker på at systemet ikke reagerer på en gammel reference.

På figur 5 er middelværdien vist sammen med referencen indenfor vinduerne. Forstærkningen bliver udregnet ved at sammenligne dem mod hinanden, som er vist i den nederste del af figuren.

K_{VPP} er et tal på hvilken effekt der bliver trukket af puljen, når der sættes en reference $P_{act} \approx P_{ref} K_{VPP}$. Det kan også betragtes som et tal på hvor god estimatoren er, samt om den overestimerer eller underestimerer effektforbruget. Derfor er det væsentligt at påpege at

denne analyse er foretaget i juli, hvor temperaturen har været høj, og der derfor ikke har været stort behov for varme.

Blev analysen foretaget om vinteren vil der uden tvivl være forskel i den udregnede dc-forstærkning. Det kan være estimatoren er meget præcis indenfor et bestemt temperaturinterval, hvor den bliver mere upræcis når temperaturen bevæger sig ud af dette vindue. Var alle rum f.eks for kolde vil varmepumperne være mere tilbøjelige til at starte når de blev tændt for, dermed reagere på den måde der forventes af styringen.

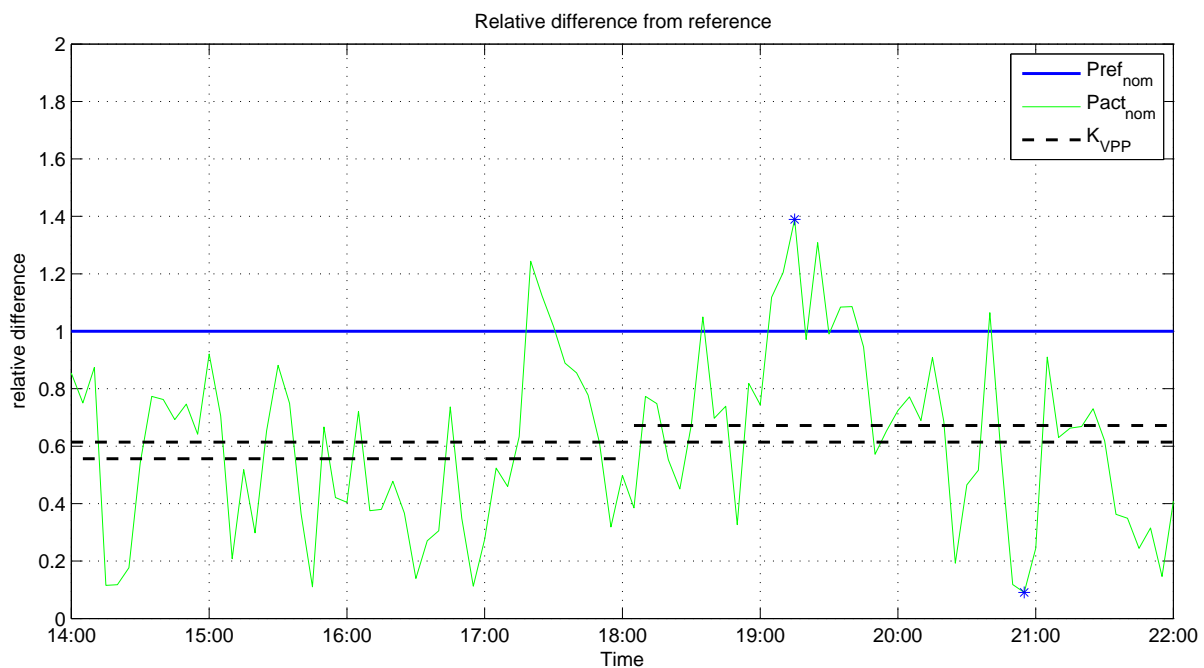
Forstærkningen er taget som et snit af de to udregnet i hvert tidsvindue.

$$K_{VPP} = \text{mean}([0,556; 0,672])$$

$$= 0,614$$

Forstyrrelsen d er taget som max og min værdier ift. middeleffekten, hvilket giver et tal på outputtet i spændet:

$$d = [-7,3; 10,9]$$

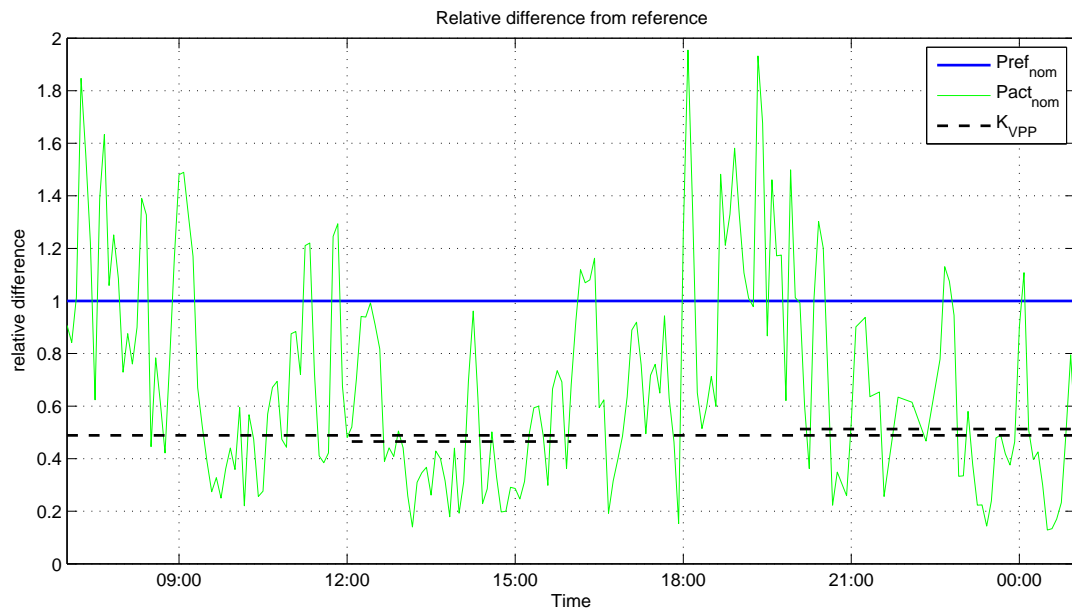
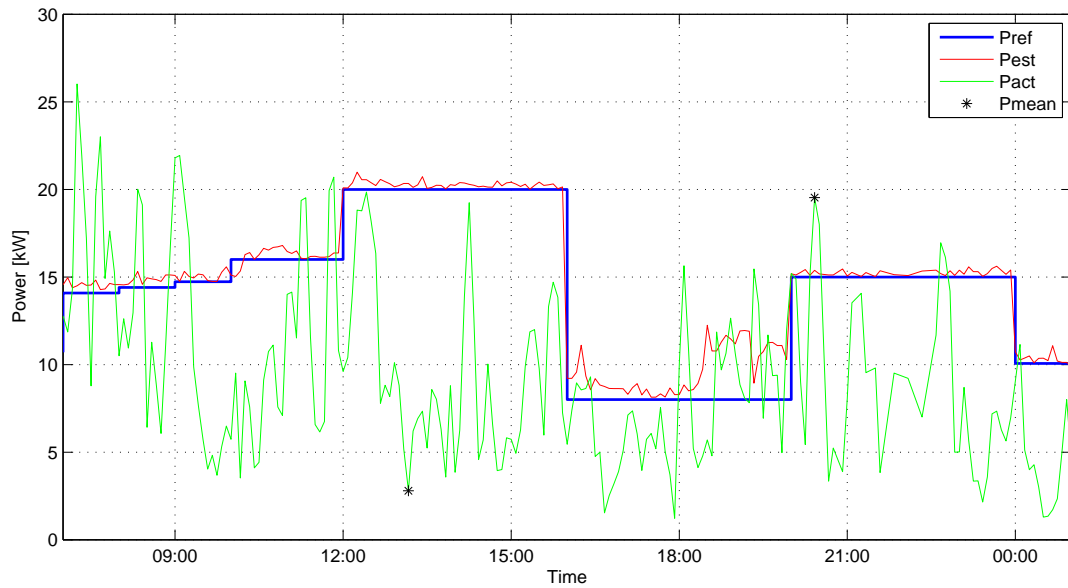


Figur 5: Bestemmelse af dc-forstærkning K_{VPP} .

Data fra 8. juli 2014 gav nogle sammenlignelige resultater efter samme fremgangsmåde. Grafen af systemet er vist på figur 6.

$$K_{VPP} = 0,49$$

$$d = [-6,8; 11,7]$$



Figur 6: Bestemmelse af dc-forstærkning K_{VPP} og forstyrrelse d , ud fra analyse fra 8. juli 2014.

3 Regulator

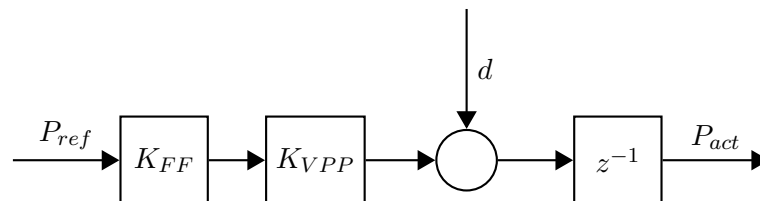
Det ses tydeligt ud fra effektmålingerne at uforudsigeligheden på udgangseffekten er den dominerende faktor, der skal kompenseres for. Især hvis den simple model vist i figur 1 passer tilnærmelsesvist, er forstyrrelsen d den væsentligste faktor.

Under åbensløjfe kørslerne blev regulatoren sat ud af funktion, altså $P_{ctrl} = P_{ref}$. Dette betyder at den manglende effekt bliver udregnet til referencen fratrukket den estimerede minimale effekt, hvilket svarer til en feedforward regulator med en forstærkning på én. For at have en mere generel ligning af regulatoren, kaldes feedforward forstærkningen K_{FF} . Denne forstærk-

ning kan ændres hvis det viser sig at være fordelagtigt for responsen af systemet.

$$P_{ctrl} = K_{FF} P_{ref}$$

Som udgangspunkt vil et bud på en regulator være blot at skrue op for feedforward leddet til $K_{FF} = 1/K_{VPP}$. Dette vil helt banalt give en gennemsnitlig effekt på den ønskede reference, men da dc-forstærkningen K_{VPP} ikke kan bestemmes nøjagtigt og blot er en grov forsimpning af virkeligheden, er det ikke den optimale løsning til den fysiske pulje. I stedet holdes fast i $K_{FF} = 1$ og der fokuseres på at kompensere for udsvingene i effektforbruget vha. en tilbageføringsregulator (feedback-controller).



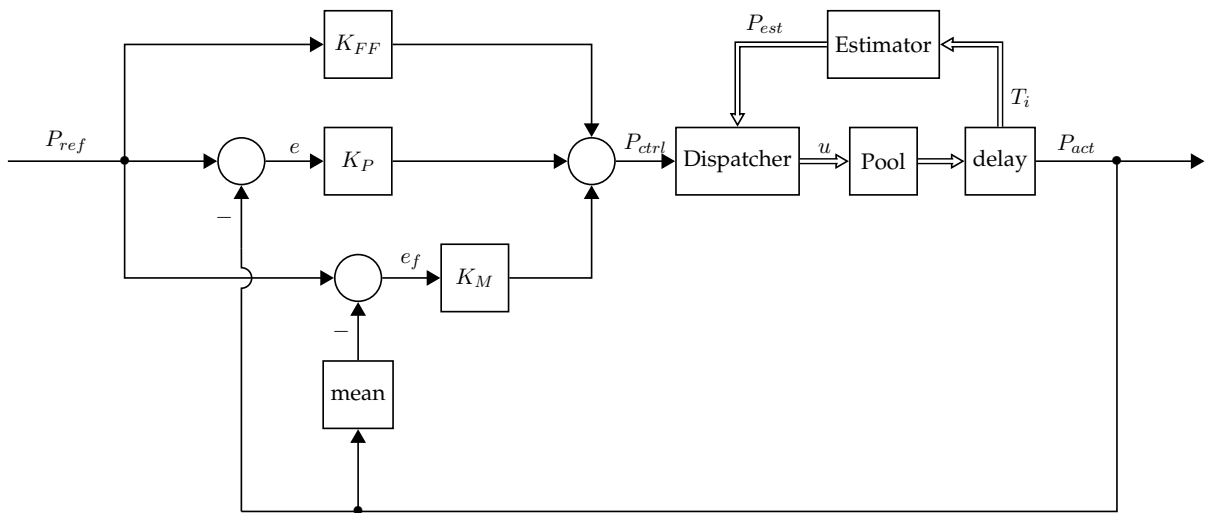
Figur 7: Simple model af puljen af varmepumper med feedforward regulator. Sampletid $T = 5$ min. Det ses tydeligt at referencen kan nåes gennemsnitligt ved at $K_{FF} = 1/K_{VPP}$, så længe d varierer ligeligt som et bidrag og et fradrag.

3.1 Tilbageføringsregulator

Som vist er uforudsigeligheden af udgangseffekten hovedsagligt det der skal kompenseres for. Derfor er det valgt at implementere et proportionalled der reagerer på en filtrering af den målte effekt. Det valgte filter er en løbende midling, der ser tilbage på en halv times målinger.

$$\begin{aligned} m_{ctrl} &= K_M e_f \\ &= K_M (P_{ref} - \text{mean}(P_{act}(n-5:n))) \end{aligned}$$

Reguleringsdelen er implementeret med en feedforward forstærkning på referencen, en proportional forstærkning af tilbageføringen og en proportional forstærkning af den filtrerede tilbageføring. Filteret er en løbende midling taget over seks samples (svarende til 30 min.). Styringen er illustreret i blokdiagrammet nedenfor, hvor z^{-1} indikerer en forsinkelse på én sample (5 min.). Forsinkelsen kommer af at den effektmåling der kommer fra varmepumperne bliver sendt til serveren hvert 5. minut.



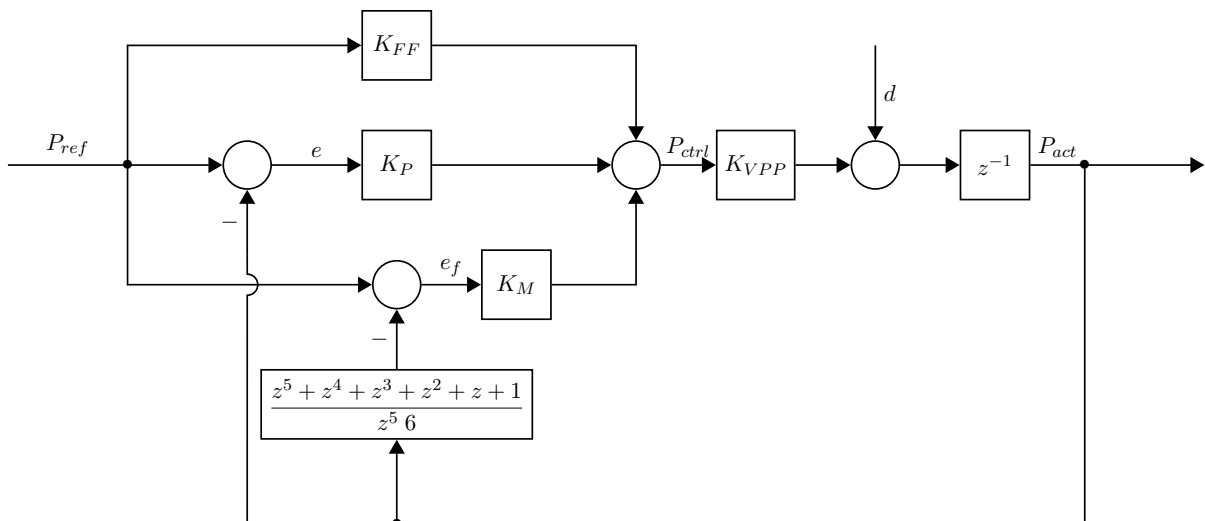
Figur 8: Blokdiagram af styringsstruktur til pulje af varmepumper.

Den løbende midling (mean) kan skrives som et lineariseret udtryk i z-planet. Hvis målingerne er forældede, f.eks i opstarten af sløjfen, vil det blot være gennemsnittet af de tilgængelige data inden for den sidste ½ time.

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{1 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + z^{-4} + z^{-5}}{6} \\
 &= \frac{z^5 + z^4 + z^3 + z^2 + z + 1}{z^5 6}
 \end{aligned}$$

3.2 Blokdiagram

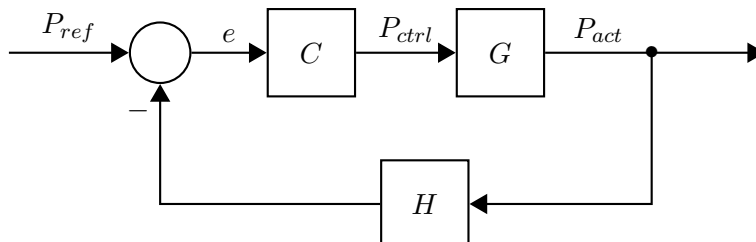
Ved at erstatte afvikler, estimator og pulje med den simple model vist i figur 3 fås det lineariserede diskrete system vist i figur 9.



Figur 9: Blokdiagram af lineariseret model af pulje med regulator.

4 Overføringsfunktion

Ved at reducere blokdiagrammet kan der findes tre ligninger der beskriver det samme system som vist på figur 9. Ved at forkorte systemet til blokdiagrammet vist på figur 10 bliver tuningen mere overskuelig. Ligningerne til blokkene står skrevet i 1.



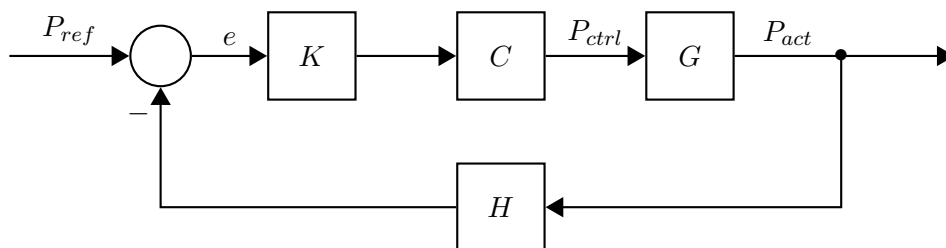
Figur 10: Blokdiagram af simpelt tilbageføringssystem

$$\begin{aligned}
 C &= K_{FF} + K_P + K_M \\
 G &= \frac{K_{VPP} + d}{z} \\
 H &= \frac{K_P + K_M F}{K_{FF} + K_P + K_M} \\
 &= \frac{z^5(6K_P + K_M) + K_M(z^4 + z^3 + z^2 + z + 1)}{z^5 6(K_{FF} + K_P + K_M)}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Der er flere måder at finde frem til den bedste tuning af forstærkningerne på. En af dem er analytisk design, hvor der ses på hvor rødderne til systemets karakteristiske ligning skal placeres for at få den ønskede respons.

4.1 Analytisk tuning

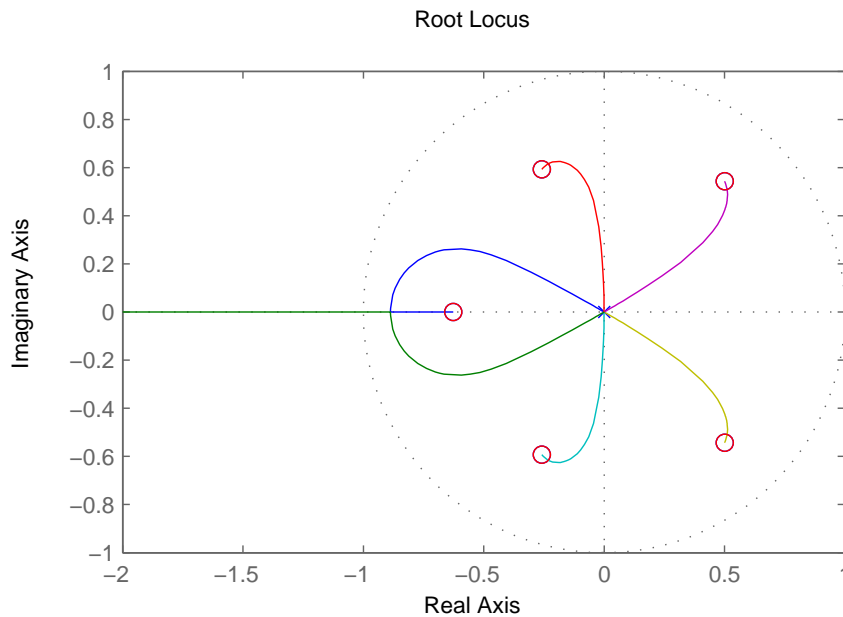
Når der analyseres på stabiliteten af et system, kan der indføres en åbensløjfe forstærkning K på systemet, hvor der ses på hvor høj den kan være før systemet bliver ustabil. Der ses på hvor rødderne af systemet kommer til at ligge. Nulpunkterne er rødderne af et systems åbensløjfe funktion $KCGH = 0$, mens polerne er rødderne af den karakteristiske ligning $1 + KCGH = 0$. Systemet kommer derved til at se ud som på figur 11. Grafen for $0 \leq K \rightarrow \infty$ kaldes en rodkurve.



Figur 11: Blokdiagram af simpelt tilbageføringssystem, med $0 \leq K \rightarrow \infty$ for at vise rodkurven.

Polerne vil bevæge sig mod nulpunkterne når K hæves. Den maksimale værdi af K inden polerne krydser enhedscirklen indikerer systemets stabilitet. Ligger polerne udenfor enhedscirklen er det tegn på instabilitet.

Rodkurven af systemet er illustreret på figur 12 med $K_P = 1 \wedge K_M = 1$. Det ses at kun én af polerne vil bevæge sig udenfor enhedscirklen når $K \rightarrow \infty$.



Figur 12: Rodkurve for overføringsfunktionen $1 + KCGH$, hvor $K_P = 1 \wedge K_M = 1$.

Den maksimale værdi hvor systemet er stabilt er $K = 1,7$. Taget i betragtning af de store udsving der er i målingerne, og at usikkerheden ved åbensløjfe analysen, virker det som en for lav værdi. Det er valgt at designe ud fra en værdi på $K = 5$.

De to forstærkninger der kan skrues på er K_P og K_M , hvorfor der vil være flere resultater til problemet. Den måde systemet er modelleret på, gør at det vil være absolut stabilt ved at sætte $K_P = 0 \wedge K_M = 0$. I virkeligheden giver det ikke meget mening, og der er andre grunde til at skrue op for forstærkningerne, hurtigere respons er én af dem. Det ønskes at finde de maksimale forstærkninger der kan bruges før systemet bliver marginalt stabilt ved $K = 5$.

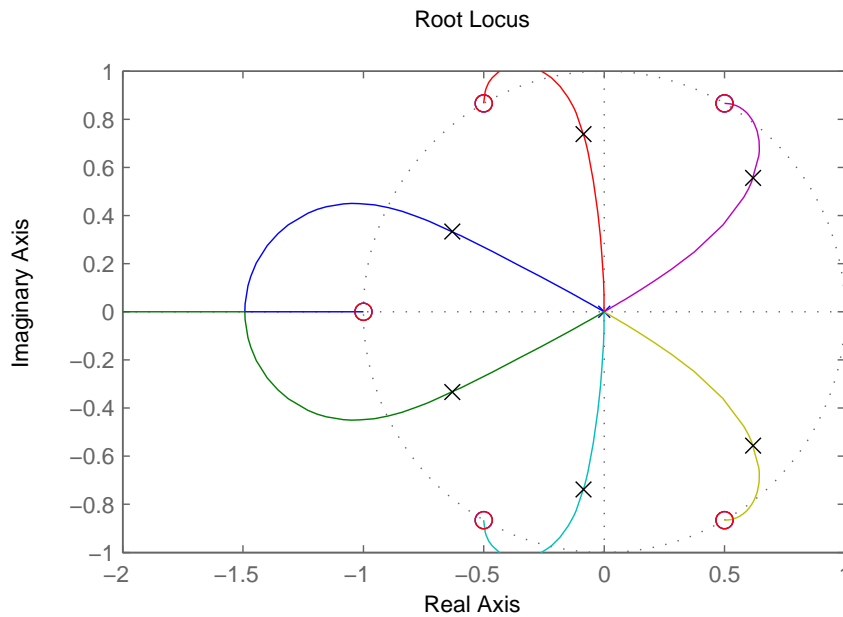
Det kan skrives i Matlab som

```
K=5;
Kvec=0:0.1:3;
tuning=[];
for n=1:length(Kvec)
    Km=Kvec(n);
    for m=1:length(Kvec)
        Kp=Kvec(m);
        Qz=[6 K*Kvpp*[6*Kp+Km Km*[1 1 1 1 1]]];
        rt=roots(Qz);
        art=max(abs(rt));
        if art<1
            tuning(end+1,:)= [Km Kp];
        end
    end
end
end
```

Ved at filtrere alle de mindre værdier af tuningerne væk, giver dette fire kombinationer:

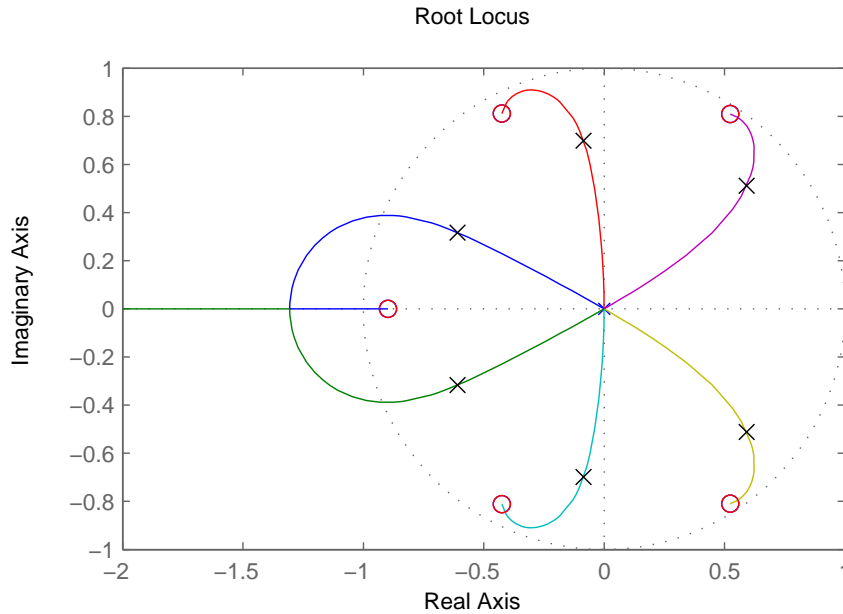
$$[K_P \ K_M] = \begin{bmatrix} 0 & 1,9 \\ 0,1 & 1,4 \\ 0,2 & 1 \\ 0,3 & 0,7 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Den højeste forstærkning er naturligvis $K_P = 0 \wedge K_M = 1,9$. Vælges denne tuning giver dette en rodkurve som vist i figur 13. Det ses at det ikke længere kun er én af polerne der bevæger sig ud over enhedscirklen, alle poler bevæger sig ud af stabilitetsområdet.



Figur 13: Rodkurve med $K_P = 0 \wedge K_M = 1,9$, hvor polerne er tegnet for $K = 1$. Det ses at alle poler bevæger sig udover enhedscirklen.

Med en tuning på $K_P = 0,1 \wedge K_M = 1,4$, giver det en rodkurve som vist på figur 14. Med denne tuning er det kun de to poler længst ud af den negative reelle akse der bevæger sig ud af stabilitetsområdet.



Figur 14: Rodkurve med $K_P = 0,1 \wedge K_M = 1,4$, hvor polerne er tegnet for $K = 1$. Det ses at kun to af polerne bevæger sig ud over enhedscirklen.

Ud fra analytisk design er de fire forskellige tuninger givet i ligning 2 lige gode. Altså de overholder et stabilitetskrav på $K = 5$. Disse forskellige tuninger er testet på den virkelige pulje, hvilket har givet anledning til at lave forbedringer på designet. Der er ændret yderligere i værdierne og regulator-designet til det system der er beskrevet i hovedrapporten.

5 Konklusion

I denne bilagsrapport er der lavet teoretiske analyser af mulige styringer til VPP. Der er taget udgangspunkt i en generel PID regulator. Det er denne regulator, som er aftestet og anvendt som udgangspunkt i styringen i hovedrapporten. Regulatoren er dog blevet justeret og reduceret i kompleksitet løbende ud fra indkomne testresultater. Herefter har regulatoren vist sig stabil og anvendelig til brug for puljestyringen.