

Grond gekoppelde warmtepompsystemen

Dit artikel gaat in op het belang van de regeling van warmtepompsystemen, in zowel de ontwerp- als gebruiksfase, gekoppeld aan een traag reagerend afgiftesysteem zoals betonkernactivering (BKA) en een boorveld met verticale warmtewisselaars (figuur 1). Aangevoerd wordt de aanzienlijke meerwaarde van een modelgebaseerde predictieve regelstrategie (MPC) ten opzichte van een conventionele regelgebaseerde strategie (RBC) voor het reduceren van zowel de investeringskosten als werkingskosten.

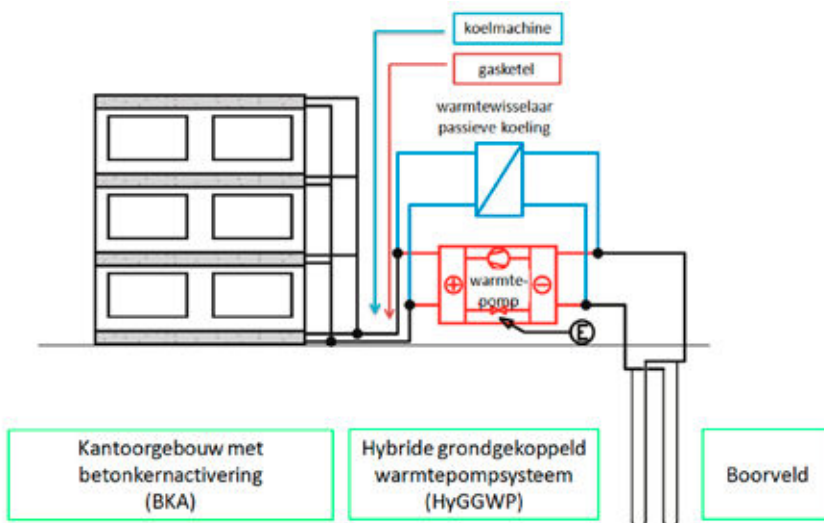
Dr.ir. S.D. (Clara) Verhelst en prof.dr.ir. L.M.L. (Lieve) Helsen, Katholieke Universiteit Leuven (KU Leuven), Departement Werktuigkunde, Afdeling Toegepaste Mechanica en Energieconversie, België

ONTWERP WARMTEPOMPSYSTEEM

In gebieden waar de bodemgesteldheid geen koude/warmteopslag in aquifers toelaat, biedt een boorveld met gesloten verticale warmtesondes een goed alternatief. De diepte,

het aantal en de configuratie van de boorputten hangt af van de bodemeigenschappen en het warmte- en koudevraagprofiel. Ontwerpssoftware zoals EED (Earth Energy Designer) bepaalt de boorputlengte op basis van de gemiddelde maandelijkse warmte- en

koudevraag, de maandelijkse piekvermogens en de bijhorende piekduur. Met deze input wordt het verloop van de fluïdumtemperatuur (in en uit de grondwarmtewisselaar) over een vooropgestelde periode, typisch 20 jaar, gesimuleerd. De totale boorputlengte wordt iteratief aangepast. De optimale lengte is die waarbij de fluïdumtemperatuur op het einde van de simulatieperiode de maximale of minimale limiet bereikt (zie figuur 2). Hoe groter de onbalans tussen warmte- en koudevraag op jaarbasis en hoe groter de vermogenspieken, hoe groter de benodigde lengte. Omdat de investeringskost quasi lineair stijgt met de boorgat lengte, is het dus nuttig om zowel de onbalans tussen de warmte- en koudevraag als de grootte van de vermogenspieken, te reduceren.



-Figuur 1- Met een grond gekoppeld warmtepompsysteem met betonkernactivering aan afgiftezijde en een boorveld aan bronzijde is het mogelijk om met een hoge COP te verwarmen en passief te koelen. Het warmte- of koudevermogen dat niet aan het boorveld wordt onttrokken, wordt door de backup gasketel en koelmachine geleverd.

IMPACT THERMISCHE ONBALANS

Omwille van de impact van thermische onbalans op de benodigde boorveldgrootte zijn grondgekoppelde warmtepompsystemen (GGWP) economisch interessanter voor kantoorgebouwen dan voor residentiële gebouwen, gezien kantoorgebouwen naast

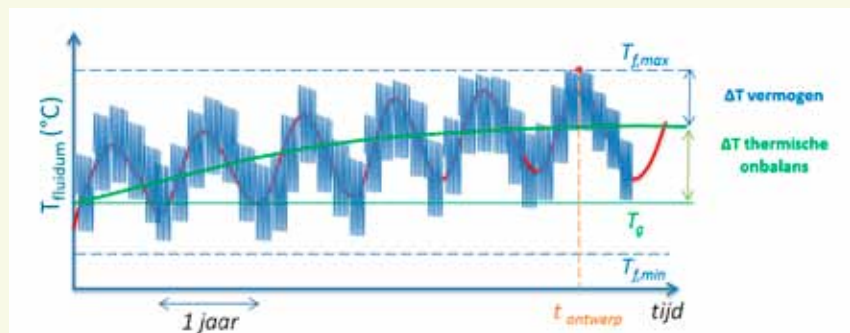
een warmtevraag typisch ook een substantiële koudevraag hebben. Bij kantoorgebouwen ziet men zelfs steeds vaker dat de koudevraag de warmtevraag overschrijdt. In dat geval stellen ontwerprichtlijnen voor om bijkomend een traditionele koelmachine te voorzien om die onbalans op te vangen en zo de investeringskosten van het boorveld te beperken. Analooeg wordt voor warmtevraag gedomineerde gebouwen een bijkomende verwarmingsinstallatie, zoals een gasketel, aangeraden. Deze combinaties vallen onder de noemer "hybride grondgekoppelde warmtepompsystemen (HyGGWP)".

■ IMPACT VERMOGENSPROFIEL

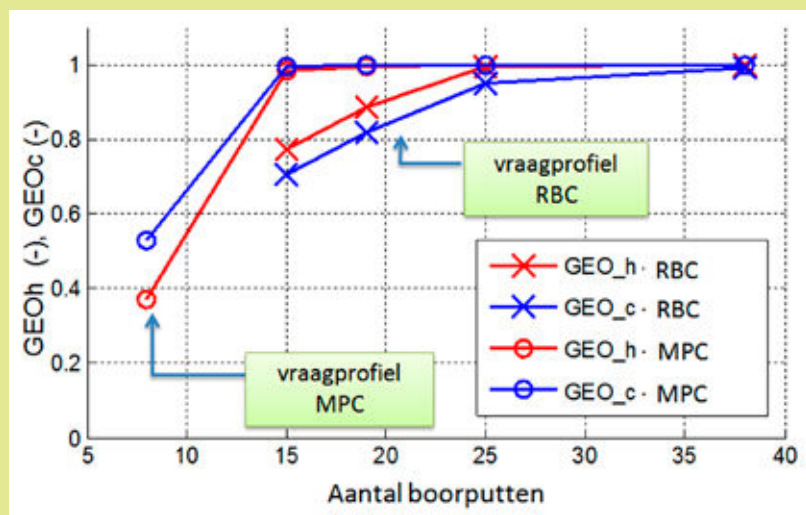
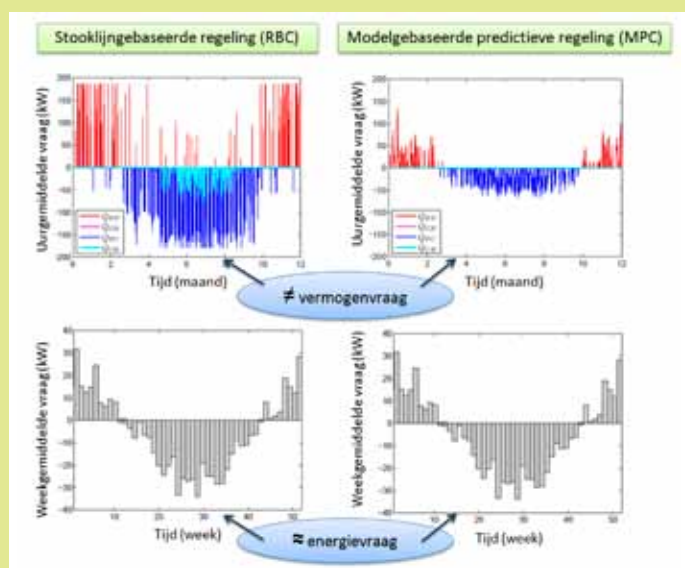
Een tweede manier om de boorveldgrootte te beperken, is om grote vermogenspieken in de warmte- en koudevraag te vermijden. Daarom is BKA een ideaal afgiftesysteem voor een (Hy)GGWP. BKA laat immers toe om exergetisch optimaal te gaan verwarmen en koelen, namelijk via lage-temperatuurverwarming met een warmtepomp (WP) en hoge-temperatuurkoeling met passieve koeling (PK). Maar ook om een vlak vraagprofiel te realiseren. Het potentieel van BKA om op die manier de benodigde boorveldgrootte, en dus de investeringskost van (Hy)GGWP te reduceren, heeft in de literatuur nog weinig aandacht gekregen. Hoe komt dit?

Voor kleinere systemen wordt het vermogensvraagprofiel vaak bepaald op basis van statische warmte- en koellastberekeningen. Voor grotere projecten wordt het vermogenprofiel bepaald via dynamische gebouwsimulaties in bijvoorbeeld Trnsys, EnergyPlus of Modelica. Deze simulaties laten toe om de impact van zonnewinsten en interne winsten accuraat in te schatten, rekening houdend met de thermische massa van het gebouw. Het vermogenprofiel aan installatiezijde bij systemen met BKA hangt echter niet enkel af van de warmte- en koudelasten op het niveau van de zone, maar ook – omwille van de thermische massa van BKA – van de regeling. De vraag luidt welke regeling toelaat om de thermische massa van BKA daadwerkelijk in te zetten voor het afvlakken van het vraagprofiel, rekening houdend met de impact op de energiekosten en het thermische comfort. Hier zit nu net de pijn.

Huidige regelstrategieën zijn gebaseerd op het principe van de stooklijn en koellijn. Deze geven de vertrek- of terugvoertemperatuur die nodig is om de thermische verliezen in stationaire toestand te compenseren bij een gegeven buitentemperatuur en een gewenste binnentemperatuur. Het probleem bij afgiftesystemen met een grote thermische massa zoals BKA, is dat het systeem zelden of nooit



-Figuur2- De dimensionering van het boorveld gebeurt op basis van een dynamische simulatie van het verloop van de vloeistoftemperatuur T_f in functie van de specifieke bodemkarakteristieken en het opgelegde warmte- en koudevraagprofiel. De boorveldgrootte wordt iteratief aangepast totdat de vloeistoftemperatuur T_f de minimale of maximale grens bereikt na de vooropgestelde tijdshorizon $t_{ontwerp}$ (typisch 20 jaar). Hoe groter de onbalans tussen de warmte- en de koudevraag en hoe groter de vermogenspieken, hoe groter het benodigd boorveld.



-Figuur3- Dimensionering van een grondgekoppeld warmtepompsysteem gebeurt op basis van een dynamische gebouwsimulatie. Deze grafieken voor een kantoorgebouw met BKA gesimuleerd in Trnsys, illustreren het belang van de geïmplementeerde regeling bij het ontwerp van installaties in het algemeen, en van boorvelden in het bijzonder. Links boven: vermogenprofiel met een stooklijngebaseerde regeling. Rechts boven: met een modelgebaseerde predictieve regeling. In dit voorbeeld geven beiden aanleiding tot eenzelfde jaarlijkse warmte- en koudevraag (zie grafiek midden) terwijl de vermogensvraag verschilt met een factor 4 (zie grafiek bovenaan). Het benodigd aantal boorputten om een zekere fractie van de warmtevraag (GEO_h , rood) of van de koudevraag (GEO_c , blauw) te dekken is hierdoor significant verschillend (zie grafiek onderaan).

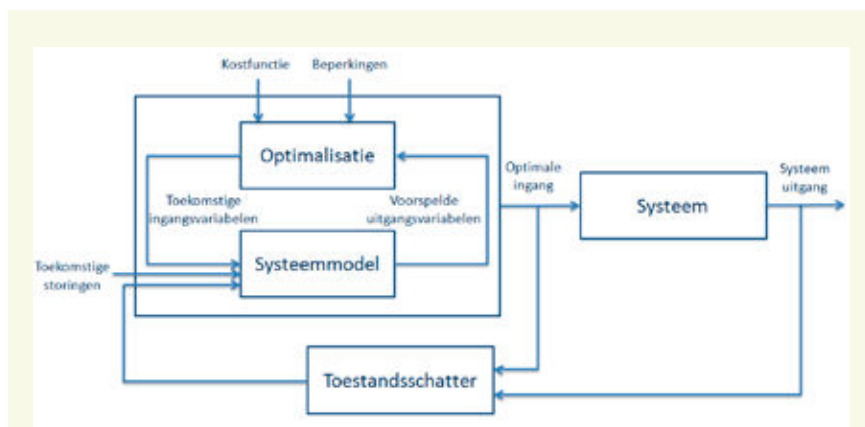
stationaire toestanden bereikt. Het is daarom nodig om te voorspellen wat het gebouw thermisch nodig zal hebben om deze warmte of koude tijdig naar de BKA te sturen. Dit gebeurt nu door de start- en stoptijd van de installatie manueel of adaptief aan te passen, de dode band op de zonetemperatuur te verschuiven etc. Het is niet evident om deze parameters te 'tunen', omdat ze aangepast moeten worden aan de bouwparameters, de toestand van het systeem, de geïnstalleerde vermogens... en ze elkaar onderling beïnvloeden. Wanneer verschillende installaties warmte en koude kunnen leveren, zoals het geval is bij een hybride GGWP-systeem, komen daar extra regelparameters bovenop om de warmte- en koudeproductie over de verschillende componenten, i.e. GGWP en PK versus backup installatie, te verdelen. Bovendien kan een bepaalde set van parameterwaarden goed zijn in het stookseizoen, maar falen in het tussenseizoen en koelseizoen, en vice versa. Kortom, *huidige regelstrategieën zijn niet in staat om het volledige potentieel van het (Hy)GGWP systeem met BKA – zijnde goed thermisch comfort aan een lage energiekost en met een laag vermogen – te realiseren.*

De vraag of huidige regelstrategieën toereikend zijn, is niet enkel voor de gebruiksfase maar ook voor de ontwerpfase cruciaal. De regeling waarmee de dynamische simulatie wordt uitgevoerd bepaalt immers in grote mate de energievraag en het vermogensprofiel. Het antwoord is dat er regelstrategieën zijn die veel performanter zijn. Een vergelijking (zie figuur 3) van een stooklijngebaseerde of 'regelgebaseerde (RBC)' strategie met een modelgebaseerde predictieve regeling (MPC) toont aan dat het piekvermogen met MPC een factor 4 lager is dan met een goed ingestelde RBC, waarbij hier bovenop zowel het thermisch comfort als de energetische performantie verbeteren. Het hoeft geen betoog dat dit significante implicaties heeft voor de dimensionering van het boorveld en/of van de backup installatie. Vanuit het oogpunt van investeringskost loont het zeker de moeite om aandacht te besteden aan de regeling tijdens het uitvoeren van dynamische simulaties.

■ VERSCHIL MET HUIDIGE REGELSTRATEGIE

In tegenstelling tot de huidige, regelgebaseerde regeling (RBC), vertrekt een modelgebaseerde predictieve regelstrategie (MPC) van een welomlijnde, optimalisatiegebaseerde aanpak. Het concept van MPC is heel intuïtief te begrijpen. MPC vervangt het denkproces van een ervaren gebouwbeheerder. Hierbij zijn volgende elementen cruciaal:

- kennis van het systeem (gebouwdynamica,



-Figuur 4- Een modelgebaseerde predictieve regeling (MPC) bepaalt de ingangvariabelen op basis van een optimalisatie. De optimalisatie houdt rekening met de actuele systeemtoestand, bepaald op basis van terugkoppeling van de metingen (Toestandsschatter), met de systeemdynamica (Systeemmodel) en met de voorspelling van storingen zoals de buitentemperatuur, de zonne-instraling, het gebruikersgedrag (Storingen). De optimale ingang is deze die de kostfunctie over een bepaalde tijdshorizon minimaliseert, rekening houdend met de beperkingen op de ingang en de uitgang.

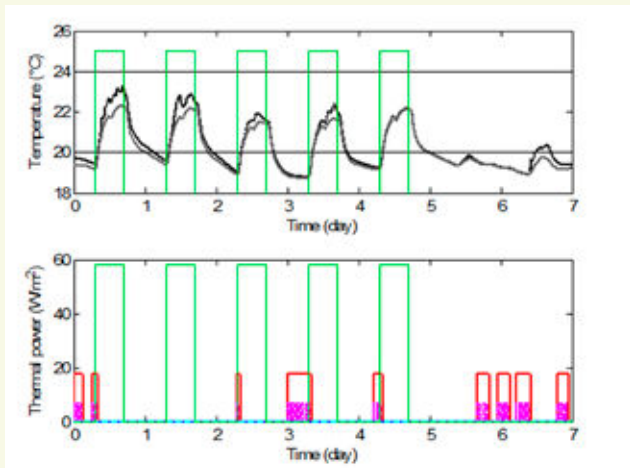
- afgiftesysteemdynamica, efficiëntie van de installatie, geïnstalleerd vermogen);
- kennis van de weersvoorspellingen;
- kennis van het toekomstig gebruiksprofiel (aanwezigheid, aantal personen, thermische comforteisen);
- objectieven (maximaal thermisch comfort en minimale energiekosten).

Bij MPC worden deze elementen in een optimalisatieprobleem gegoten. Op basis van een heel eenvoudig systeemmodel, weersvoorspellingen en voorspelling van het gebruikersgedrag, wordt voor elk van de componenten van de HyGCHP het vermogensprofiel over een gegeven tijdshorizon (voor BKA minstens drie dagen) bepaald. De optimalisatie zoekt naar die oplossing waarbij het vermogenprofiel het vereiste thermische comfortniveau haalt met minimale energiekosten, rekening houdend met het geïnstalleerd vermogen. De berekening wordt om de zoveel tijdsstappen (in te stellen) herhaald, om gebruik te maken van de terugkoppeling van het systeem via metingen en om de voorspellingen te actualiseren (zie figuur 4).

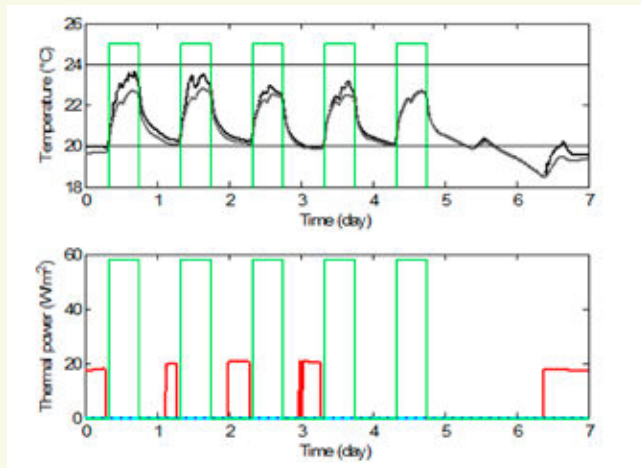
De oplossing van het optimalisatieprobleem levert rechtstreeks een antwoord op de vragen: 'Wanneer de installatie starten en stoppen?', 'Wanneer het backup-systeem gebruiken?' en 'Wanneer switchen tussen koelmodus en verwarmingsmodus?'. Het basisprincipe van MPC, i.e. 'predictief, modelgebaseerd en optimaal'

is dus totaal verschillend van de stooklijngebaseerde, regelgebaseerde aanpak van een typische regelaar, waarbij deze vragen eigenlijk via allerhande vuistregels worden beantwoord. Bij een RBC worden de regelparameters in de eerste plaats getuned om het gewenste thermische comfort te bereiken en om pendelgedrag van de warmtepomp te voorkomen. Het is echter – zelfs met een professionele opvolging van de systeemprestatie en bijhorende fijnregeling van de instelwaarden – moeilijk om een laag bijhorend energiegebruik te garanderen. Uit een vergelijkende studie op basis van Trnsys-simulaties blijkt dat het verschil in energiekosten tussen een goede, fijn geregeld RBC en een MPC 20% tot 40% kan bedragen (Verhelst, 2012).

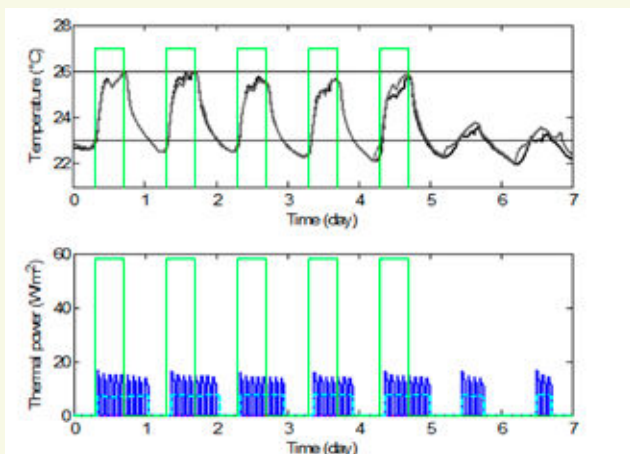
Het kleinste verschil tussen MPC en RBC (20%) nemen we waar bij relatief eenvoudige en groot gedimensioneerde systemen (bijvoorbeeld een groot boorveld met een relatief groot geïnstalleerd WP-en PK-vermogen). De meerwaarde van MPC is hier tweemaal. Het predictieve karakter van MPC laat toe de warmte- en/of koudevraag van de volgende dagen goed in te schatten. Het modelgebaseerde karakter laat toe deze warmte/koude op het juiste ogenblik te genereren en naar de BKA te sturen, rekening houdend met de traagheid van de BKA. Bovendien maakt MPC optimaal gebruik van het verschil tussen dag- en nachttarief voor elektriciteit om de energiekosten te minimaliseren.



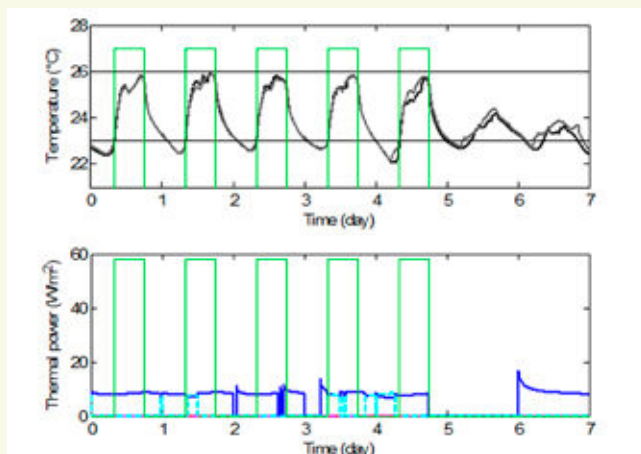
5a



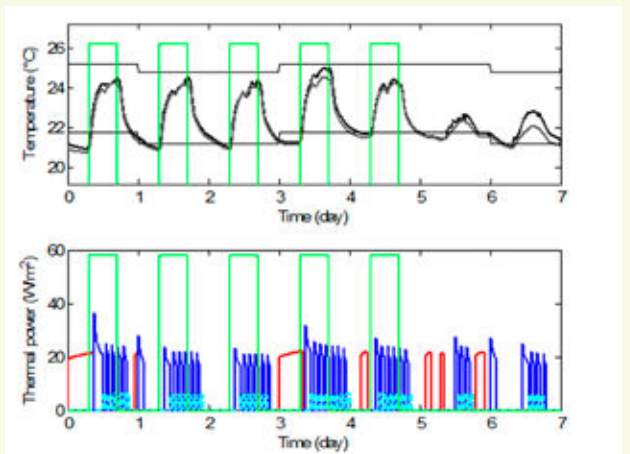
5b



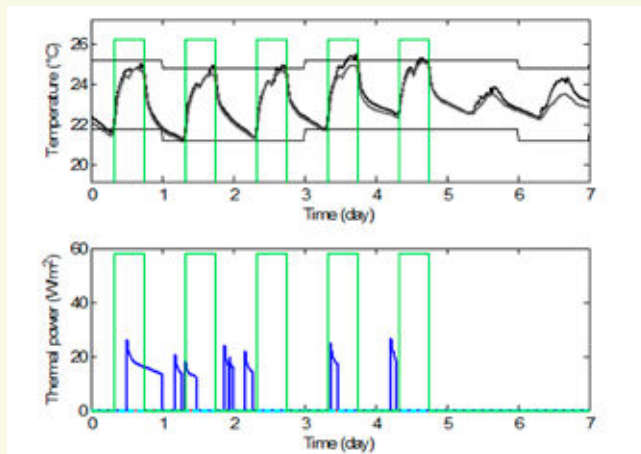
5c



5d



5e



5f

- (a) winterweek met RBC-regeling
- (c) zomerweek met RBC-regeling
- (e) tussenseizoenweek met RBC-regeling

- (b) winterweek met MPC-regeling
- (d) zomerweek met MPC-regeling
- (f) tussenseizoenweek met MPC-regeling

-Figuur 5- De vergelijking van de temperatuurprofielen en vermogensprofielen met een standaard regeling ('RBC', links) en een modelgebaseerde predictieve regeling ('MPC', rechts) voor een typische werkweek in de winter (bovenaan), in de zomer (midden) en in het tussenseizoen (onderaan), toont aan dat RBC en MPC beide een goed thermisch comfort realiseren. De zonetemperaturen blijven tijdens de kantooruren (groen) binnen de ISO7730-temperatuurgrenzen. MPC realiseert deze doelstelling echter met lagere energiekosten: er wordt minder warmte en koude geleverd, de gasketel (magenta) en de koelmachine (licht blauw) worden nauwelijks gebruikt en er is minder pendelgedrag van de warmtepomp (rood) en van de passieve koeling (blauw).

Het grootste verschil (40%) tussen MPC en RBC nemen we waar bij de complexere hybride systemen, met een kleiner vermogen van de WP en de PK omwille van het kleiner Boorveld.

De bijkomende meerwaarde van MPC is hier dat MPC kennis heeft van het vermogen dat uitgewisseld kan worden met het Boorveld. MPC tracht de benodigde warmte of koude

te genereren met het beschikbare WP- en PK-vermogen en vermijdt hierdoor het gebruik van het backupstelsel. Het afvlakken en het verschuiven van het vermogensprofiel is

mogelijk door gebruik te maken de thermische massa van de BKA en het gebouw.

■ MPC VOOR ALLE SEIZOENEN

Zowel in het stookseizoen, het koelseizoen als het tussenseizoen is de meerwaarde van MPC ten opzichte van RBC significant. Figuur 5 (vorige pagina) geeft het temperatuurverloop en het vermogensprofiel van de installatie van een typische werkweek weer in respectievelijk het stook-, koel- en tussenseizoen. Op het niveau van de zone stellen we vast dat beide regelaars in staat zijn de zonetemperatuur in de noord- en zuidzone tijdens de kantooruren (aangegeven in het groen) binnen de thermische comfortgrenzen te houden. Op het niveau van de installatie merken we volgende verschillen op:

- MPC anticipeert beter op het weekend. De installatie werkt op vrijdag en zaterdag nauwelijks of niet, en start op zondag tijdig op;
- in het stookseizoen begint de MPC vroeger te verwarmen dan de RBC, waardoor meer gebruik van het nachttarief wordt gemaakt. Bovendien is het hierdoor niet nodig om het backup systeem aan te schakelen. Wat niet te zien is in figuur 5, maar een belangrijke impact heeft op het elektriciteitsverbruik van de WP, is dat een vlak vermogensprofiel aanleiding geeft tot een gemiddeld lagere aanvoertemperatuur naar de BKA. Dit resulteert bijgevolg in een hogere COP;
- in het koelseizoen kiest de MPC ervoor om de BKA continu te koelen. Het bijhorend koelvermogen is laag en kan quasi volledig met passieve koeling gedekt worden. Dit is

niet het geval met de RBC, die aanleiding geeft tot een aan/uit-werking van de passieve koeling en een groot gebruik van de backup koelmachine;

- in het tussenseizoen is het verschil tussen MPC en RBC nog het meest frappant. Terwijl RBC alterneert tussen verwarmen en koelen, dekt MPC slechts de netto behoefte – in dit geval een beperkte hoeveelheid koeling.

■ COMMERCIEËLE IMPLEMENTATIE

MPC is een standaard regeltechniek in de chemische procesindustrie, waar het ook haar oorsprong kent. Ook in de ruimtevaart, luchtvaart en automobielsector wordt MPC met succes toegepast. Voor de toepassing in de gebouwsector staat MPC echter nog in haar kinderschoenen. Dit is enerzijds te wijten aan de aanwezigheid van moeilijk te voorspellen storingen, zoals zonne-instraling en gebruikersgedrag, en anderzijds aan het feit dat voor ieder gebouw een eigen dynamisch gebouwmodel moet geïdentificeerd worden. Op dit ogenblik worden verschillende methoden onderzocht die moeten toelaten om op basis van een beperkte meetperiode en een beperkt aantal sensoren een goed regelaarmodel te identificeren [2-6]. Als we hierin slagen, is de weg naar een commerciële implementatie van MPC geopend.

■ DANKWOORD

De auteurs bedanken het Instituut voor de Aanmoediging van Innovatie door Wetenschap en Technologie in Vlaanderen

(IWT-Vlaanderen) voor de financiële steun in het kader van de doctoraatsbeurs 'Modelgebaseerde Predictieve regeling van grondgekoppelde warmtepompsystemen in kantoorgebouwen' van auteur Clara Verhelst en het EraSME – Geotabs-project (100403).

■ REFERENTIES

1. C. Verhelst, Model predictive control of ground coupled heat pump systems for office buildings (PhD thesis); KU Leuven; 2012
2. P. Bacher and H. Madsen. Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings. *Energy and Buildings*, 43(7):1511–1522, 2011
3. M. Bianchi. Adaptive Modellbasierte Prädiktive Regelung einer Kleinwärmepumpenanlage. PhD thesis, ETH Zürich, 2006
4. Rabl. Parameter Estimation in Buildings: Methods for Dynamic Analysis of Measured Energy Use. *Journal of Solar Energy Engineering*, 110(1):15, 1988
5. M. Sourbron, C. Verhelst, L. Helsen. Building models for model predictive control of office buildings with concrete core activation. *Journal of Building Performance Simulation*, accepted 2012.
6. E. Zacekova, Z. Vana, J. Cigler, J. Hoogmartens, C. Verhelst, M. Sourbron, L. Ferkl and L. Helsen. System identification of controller building models based on real measurements in a Geotabs office building. 11th Rehva World Congress for Building Technologies - Clima, Prague, 2013

Alles voor een gezond binnenklimaat

Solid Air levert alles op het gebied van klimaatbeheersing en luchttechniek, van roosters en luchtbehandelingkasten tot en met koelconvectoren en klimaatplafonds. Producten van Solid Air onderscheiden zich door efficiënt warmte-/koude transport, laagtemperatuurverwarming, hogere lekdichtheidsklassen en het gebruik van duurzame materialen.



Luchtbehandeling Luchtverdeeltechniek Klimaatplafonds



tel +31 (0)20 696 69 95
mail@solid-air.nl
www.solid-air.nl

Good climate. better performance!