

Auteurs U. (Umberto) Peluso, MSc, EngD (TU/e), Dr.ir. P. (Pieter-Jan) Hoes (TU/e), Ir. T.A.J. (Dennis) van Goch, EngD (Itility)

Tool voor kwantificering van energieflexibiliteit uit thermische massa van gebouwen

Het gebruik van zon en wind als hernieuwbare energiebronnen om elektriciteit te produceren is belangrijk om de klimaatdoelen te halen. Het gebruik van deze bronnen leidt echter ook tot grote schommelingen in de elektriciteitsproductie. Flexibiliteit in zowel het aanbod als de vraag naar elektriciteit is dan ook cruciaal om de elektriciteitsnetwerken in evenwicht te houden.

Energieflexibiliteit kan worden gedefinieerd als het aanpassingsvermogen van een systeem aan lokale (weers-)omstandigheden, behoeften vanuit de elektriciteitsmarkt en behoeften van gebouwgebruikers (Jensen et al., 2017). Aangezien gebouwen grote gebruikers van energie zijn, is het van belang om de mate van energieflexibiliteit van gebouwen goed te begrijpen en om het op het juiste moment in te zetten.

Binnen gebouwen wordt veel gekeken naar hoe de elektriciteitsvraag kan worden verschoven door gebruik te maken van zogenaamde vraagsturing (in Engels: 'Demand Response', DR). Dit soort strategieën zijn gebaseerd op slimme regelingen van apparaten en energiesystemen in het gebouw (bijvoorbeeld laptops, liften, warmtepomp), eventueel in combinatie met energieopslag (elektrisch en/of thermisch). DR-strategieën die worden toegepast in gebouwen hebben uiteraard als belangrijke randvoorwaarde dat het comfortniveau van de gebouwgebruikers gehandhaafd blijft. In dit artikel presenteren we de resultaten van het project 'Energy flexibility services from buildings by using adaptive comfort strategies' gefinancierd door TKI Urban Energy en uitgevoerd door de TU/e en BAM.

Flexibiliteit uit de thermische massa van een gebouw

In dit project is onderzocht hoeveel energieflexibiliteit kan worden gehaald uit het toepassen van bepaalde regelstrategieën voor de verwarming en koeling van een gebouw, waarbij gebruik wordt gemaakt van de massa van het gebouw als een thermische energiebuffer. Deze DR-strategieën moeten uiteraard rekening houden met thermisch comfort van de gebouwgebruikers; daarom worden deze strategieën in dit project aangeduid als comfortstrategieën. Andere energieopslagsystemen, zoals elektrische batterijen, kunnen ook worden gebruikt voor energieflexibiliteitsdoeleinden; daarom dienen deze technologieën als een referentie in dit project.

De hoeveelheid energieflexibiliteit die kan worden geboden door het gebruik van de comfortstrategieën is afhankelijk van verschillende kenmerken van het gebouw, zoals de gebouworientatie, de grootte van de ramen ten opzichte van de totale gevel, de isolatiewaarde van de gebouwschil (Rc-waarde), de vloeroppervlakte, het gebouwvolume en de locatie (klimaat). De thermische massa van het gebouw is echter een van de belangrijkste parameters die de energieflexibiliteit van het gebouw beïnvloeden. De thermische massa van bestaande gebouwen is in principe beschikbaar zonder extra kosten; dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld elektrische batterijen.

Marktkansen van energieflexibiliteit uit gebouwen

De gebouw eigenaar kan de energieflexibiliteit van zijn gebouw op twee manieren gebruiken: 1) impliciet, waarbij de flexibiliteit wordt ingezet om te reageren op veranderende context op de markt of de lokale situatie; 2) expliciet, waarbij de flexibiliteit wordt aangeboden op een markt en indien nodig wordt gedispached. Dit laatste kan door een tussenpersoon (aggregator) worden geregeld. Deze tussenpersoon kan de flexibiliteit van meerdere gebouwen bundelen om zo voldoende flexibiliteitsvolume te genereren om het op een flexmarkt te verhandelen. Een voorbeeld van zo'n tussenpersoon is het TROEF platform (www.troef-energy.nl/), waarin TROEF de flexibiliteit van verschillende gebouwen inzet binnen een lokale



Figuur 1: Impressie van een mock-up dashboard binnen de BE-flex tool.

energiegemeenschap om zo de prestaties van de hele energiegemeenschap te verbeteren (bijvoorbeeld operationele kosten en CO₂ emissies reduceren). Op dit moment wordt het gebruik van energieflexibiliteit nog niet sterk gestimuleerd in de gebouwde omgeving, maar er worden bijvoorbeeld wel al dynamische prijscontracten aangeboden. Het gebruik van DR-strategieën voor flexibiliteitsdoeleinden in gebouwen is echter zeker nog geen gangbare praktijk in Nederland (en wereldwijd). Hierbij moet worden opgemerkt dat gebouwen relatief traag reageren waardoor de beschikbare flexibiliteit niet geschikt is voor alle flexibiliteitsmarkten (bijvoorbeeld niet voor markten die een snelle response vragen). Aangezien de elektrificatie van energiesystemen nog steeds in volle gang is, verwachten we dat (kantoor)gebouwen in de komende jaren een belangrijkere rol zullen gaan spelen in het bieden van energieflexibiliteit.

De flexibiliteit die door kantoorgebouwen kan worden geleverd is onderzocht in eerdere studies (bijvoorbeeld Goch, van 2014, Mishra et al., 2017, Papachristou., 2019, Tantawi, 2020, De Bruijn, 2021, Papachristou et al., 2021). Uit onder andere deze studies blijkt dat een gemiddeld kantoorgebouw met energielabel C naar verwachting dagelijks flexibiliteit kan bieden met een waarde van ongeveer 0,7 tot 1 euro per vierkante meter, als ondergrens. Dit project bouwt voort op die studies en gaat een stap verder om de energieflexibiliteit door DR-strategieën in de gebouwde omgeving nauwkeuriger te

kwantificeren. Dit project is uitgevoerd door de projectpartners (TU/e en BAM) in samenwerking met het TROEF-consortium en Itility.

De BE-Flex-tool

In dit project is de BE-FLEX-tool ontwikkeld door de projectpartners. De tool kan de beschikbare energieflexibiliteit van een specifiek kantoorgebouw voorspellen, rekening houdend met de comforteisen van de kantoormedewerkers en het lokale klimaat (zie Figuur 1 voor een impressie van de tool). De tool richt zich specifiek op het benutten van de energieflexibiliteit die kan worden geboden door gebruik te maken van de comfortstrategieën (Mishra et al., 2017) en de thermische massa van het gebouw. De tool levert de volgende mogelijkheden:

- De tool vergelijkt de voorspelde energieflexibiliteit van een specifiek gebouw met een vooraf gedefinieerd basisgebruik van het gebouw en met andere beschikbare energieflexibiliteitsbronnen in het gebouw, zoals elektrische batterijen.
- De tool helpt bij het identificeren van gebouwontwerpverbeteringen die de beschikbare energieflexibiliteit kunnen vergroten.
- De tool laat zien of de energieflexibiliteit die het specifieke gebouw biedt interessant is voor de energiemarkt.
- De tool presenteert de prestaties van het gebouw met diverse prestatie-indicatoren (PI's) met betrekking tot duurzaamheid en financiële aspecten, evenals het thermisch comfort van de kantoormedewerkers.

In het vervolg van het artikel zullen de belangrijkste ontwikkelstappen van de tool worden uitgelegd.

Ontwikkeling van de BE-flex-tool

Om de tool te ontwikkelen zijn de volgende stappen doorlopen. Allereerst is er een onderzoek uitgevoerd in vier kantoorgebouwen om de comfortstrategieën te testen. Hierbij is gekeken naar zowel de



Figuur 2: De referentiestrategie in een gebouw en één van de geteste strategieën.

acceptatie van de strategieën door de kantoorgebruikers, met name gericht op het beleefde thermisch comfort, als naar de geleverde energieflexibiliteit. In dit onderzoek zijn daartoe metingen uitgevoerd met sensoren op de werkplekken (o.a. temperaturen). Daarnaast is data verzameld uit de BMS-systemen en zijn vragenlijsten ingevuld door de kantoorgebruikers. Deze data is gebruikt voor de comfortstudie, maar ook om computermodellen te valideren. De tweede stap in het project is de ontwikkeling van computermodellen waarmee de flexibiliteit kan worden berekend die kan worden behaald met de comfortstrategieën. In de derde stap worden deze modellen vervolgens gebruikt in de BE-Flex tool om voorspellingen te doen voor een groot aantal kantoorvarianten.

Stap 1: Meetexperiment in kantoorgebouwen om adaptieve comfortstrategieën te testen

Uit eerdere studies is gebleken dat (kleine) variaties in de binnentemperaturen van een gebouw niet worden opgemerkt door de gebouwgebruikers, of dat de gebruikers het binnenklimaat nog steeds als comfortabel ervaren (Mishra et al., 2016). Uiteraard moeten deze variaties wel binnen een bepaalde bandbreedte blijven. Deze bandbreedte biedt een zekere flexibiliteit aan het gebouw met betrekking tot verwarming en koeling. Dit heeft geleid tot de definitie van enkele adaptieve comfortstrategieën in het NWO iCare Project (Mishra et al., 2017). Het idee is om deze strategieën te gebruiken om energieflexibiliteit te genereren zonder dat de gebouwgebruikers er discomfort van ondervinden.

Het doel van de experimentele campagne was het testen van verschillende adaptieve comfortstrategieën. Hiervoor is een experiment opgezet waarbij gedurende enkele dagen is afgeweken van de conventionele regelstrategie van het gebouw, in plaats daarvan werd één van de comfortstrategieën toegepast. In Figuur 2 is een conventionele regelstrategie van een gebouw weergegeven

samen met één van de geteste comfortstrategieën; in het experiment is ervoor gezorgd dat de temperaturen binnen de bandbreedte blijven die door het iCare project is gedefinieerd. De kantoorgebruikers waren op de hoogte van het experiment; er was vantevoren echter niet gecommuniceerd op welke dagen de comfortstrategieën zouden worden toegepast. Op alle dagen zijn er echter wel vragenlijsten uitgestuurd en ingevuld om te achterhalen wat het beleefde thermische comfort was. Op deze manier is duidelijk geworden wat de baseline was, oftewel het beleefde thermische comfort tijdens een 'normale' regelstrategie, in vergelijking met het beleefde comfort tijdens een van de comfortstrategieën. Daarnaast zijn binnentemperaturen gemeten op de werkplekken en zijn de gemeten binnentemperaturen uit het EMS opgeslagen.

In dit project hebben we de gedefinieerde strategieën onderzocht en getest in vier verschillende kantoorgebouwen:

- De eerste twee gebouwen zijn eigendom van BAM en bevinden zich in Bunnik (zie Foto 1 en Figuur 3). Deze twee gebouwen (2511 m² en 2255 m²) zijn beiden gebouwd in de jaren 80. De gebouwen zijn drie verdiepingen hoog. De experimenten voor deze twee gebouwen vonden plaats in februari-april 2022.
- Het derde gebouw is een kantoorgebouw in Amsterdam, gebouwd in 2018. Het heeft vier verdiepingen met een totale oppervlakte van 9000 m². De derde verdieping werd gebruikt in het experiment. Het experiment in dit gebouw vond plaats in april 2022 (zie ook Hillman-Eady, 2022).
- Het vierde gebouw is een kantoorgebouw in Breda, gebouwd in de jaren 90. Het heeft twee verdiepingen met een totale oppervlakte van 1500 m². Het experiment in dit gebouw vond plaats in april 2022 (zie ook Hillman-Eady, 2022).

Na de meetperiode is de data geanalyseerd en door middel van een statistische analyse is onderzocht of er een significant verschil is te zien tussen het beleefde thermische comfort op de 'normale' dagen en de dagen met de andere strategieën. Uit deze analyse blijkt dat de kantoorgebruikers geen significant verschil hebben ervaren tussen de verschillende dagen. De resultaten laten dus zien dat het mogelijk is om de comfortstrategieën te gebruiken voor energieflexibiliteitsdoelstellingen, en dus met behoud van het thermisch comfort van de kantoormedewerkers.

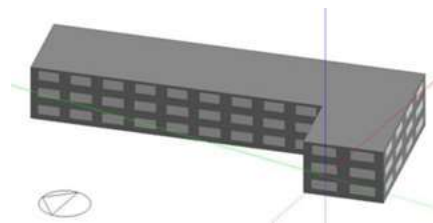
Stap 2: Ontwikkeling van gebouwenergiemodellen

De tweede stap omvatte het ontwikkelen van een rekenmodel (met behulp van EnergyPlus 9.6.0) waarmee de energieflexibiliteit van een specifiek Nederlands kantoorgebouw kan worden ingeschat. Om vertrouwen te krijgen in het model, is eerst een model opgezet voor een van de kantoorgebouwen uit de experimentele campagne (zie Figuur 4). De meetdata is vervolgens vergeleken met de resultaten van het gebouwmodel (zie Figuur 5). Uit deze vergelijking volgt een zogenaamde Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error, CV(RMSE), voor uurlijkse waarden van het energiegebruik van 20% en voor de binnentemperaturen van 8%. Het ASHRAE Handbook stelt een eis van <30% voor uurlijkse waarden, wat betekent dat het model voldoende nauwkeurig is. Het model kan vervolgens worden gebruikt om een voorspelling te maken van de energieflexibiliteit die gedurende een heel jaar door het gebouw kan worden geleverd.

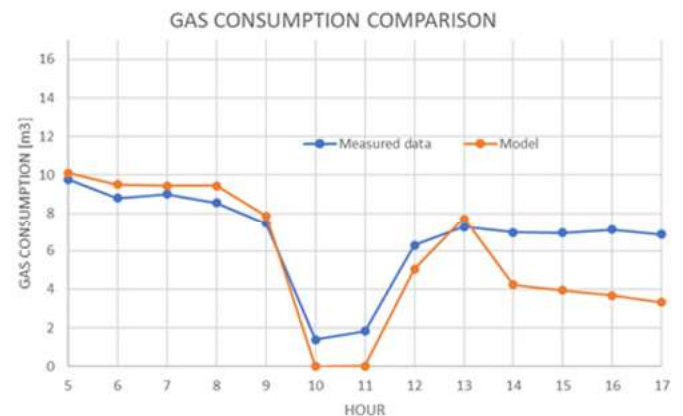
Om de energieflexibiliteit gedurende het hele jaar te berekenen, is het gebouwsimulatiemodel (EnergyPlus) gekoppeld aan een optimalisatiealgoritme ontwikkeld in Matlab 2022b. Het optimalisatiealgoritme bepaalt voor elke dag van het jaar welke regelstrategie het meest geschikt is; het algoritme kiest hierbij uit 56 verschillende strategieën. Bijvoorbeeld, een strategie waarbij



Foto 1: Eén van de kantoorgebouwen in Bunnik.

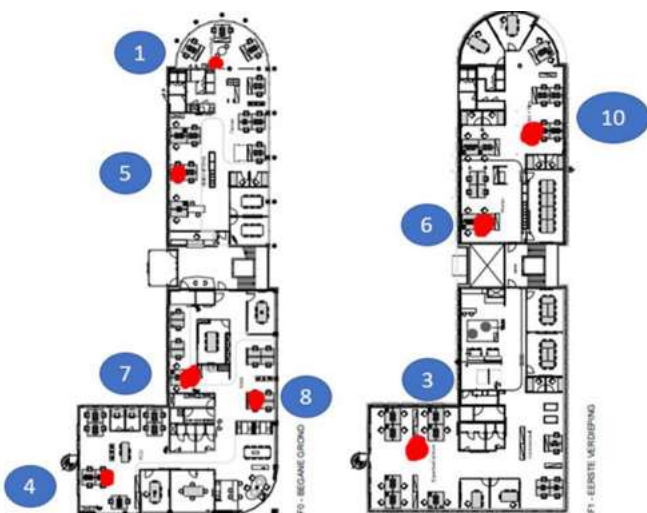


Figuur 4: Weergave van het kantoorgebouw als input voor EnergyPlus



Figuur 5: Gemeten en gesimuleerd gasverbruik voor een van de regelstrategieën.

vroeg in de ochtend wordt voorverwarmd om de ochtendpiek te voorkomen, of een strategie waarbij juist later in de ochtend extra wordt verwarmd om te profiteren van lagere energieprijzen. De gekozen regelstrategie op een bepaalde dag kan daarbij invloed hebben op de keuze voor de volgende dag, omdat de thermische massa van het gebouw relatief traag reageert. Het algoritme houdt ook rekening met de uurlijkse elektriciteitsprijzen (Dayahead markt), CO₂-emissies per kWh elektriciteit van het net, en de weersomstandigheden. Het algoritme kan vervolgens worden ingesteld om bijvoorbeeld de energiekosten

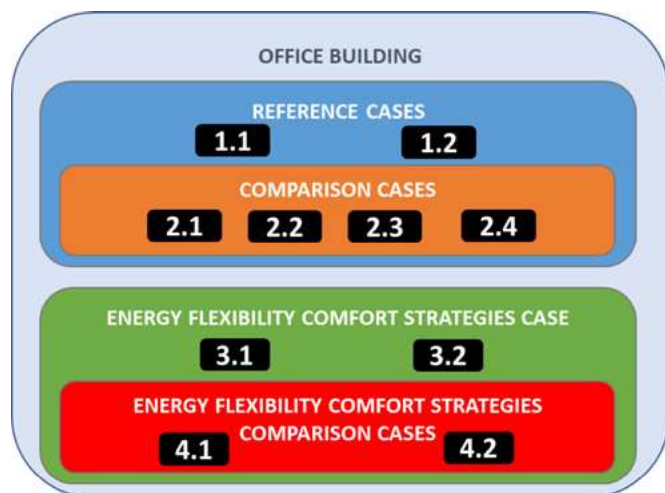


Figuur 3: Locaties van temperatuursensoren op de werkplekken.

zo laag mogelijk te houden voor het gebouw (d.w.z. elektriciteit inkopen wanneer de prijzen laag zijn en zelfopgewekte elektriciteit gebruiken wanneer de prijzen hoog zijn), of om de CO₂-emissies zo laag mogelijk te houden (d.w.z. de zelfconsumptie verhogen en elektriciteit inkopen bij lage CO₂-emissies per kWh op het net).

Stap 3: Uitvoeren van simulaties van veel voorkomen kantoorbouwvarianten

In de laatste fase van de BE-FLEX-ontwikkeling wordt het model ingezet om een database te vullen met de meest voorkomende variaties van kantoorgebouwen (gebaseerd op een database uit het NWO iCare-project (Papachristou, 2019)). Voor elke gebouwvariant (met variaties op de raamgrootte, Rc-waardes, U-waardes, geveleppervlak, vloeroppervlak, etc.) worden verschillende prestatie-indicatoren berekend. Deze prestatie-indicatoren omvatten aspecten met betrekking tot energieflexibiliteit, financiën, duurzaamheid en comfort, die vervolgens worden opgeslagen in de database. Bovendien wordt voor elke gebouwvariant een referentieberekening uitgevoerd (met de conventionele regelstrategie) en een vergelijking met alternatieve oplossingen (zoals elektrische batterijen en PV-panelen).



Figuur 6: Overzicht van de verschillende cases.

Vanwege het grote aantal gebouwvarianten (ca. 10000) in de database is het niet efficiënt om het gedetailleerde rekenmodel voor elke variant te gebruiken (onder andere vanwege de lange rekentijd; op een laptop met een gemiddelde snelheid duurt de berekening voor één gebouwvariant ca. 1 uur). Daarom is besloten om een surrogaatmodel te trainen op basis van een steekproef uit de database. De gebouwvarianten in deze steekproef zijn doorgerekend met het gedetailleerde model, waarna de resultaten zijn gebruikt om het surrogaatmodel te trainen. In het project zijn verschillende soorten surrogaatmodel methoden getest en is 5-fold cross-validation toegepast.

De best presterende methoden waren random forests en GBT; GBT is uiteindelijk gekozen omdat deze sneller te berekenen waren. De surrogaatmodellen laten een minimale R² zien van 0,92. Het surrogaatmodel kan vervolgens snel de hele database doorrekenen (in enkele seconden). Deze database is vervolgens doorzoekbaar gemaakt door middel van eenvoudige Python scripts.

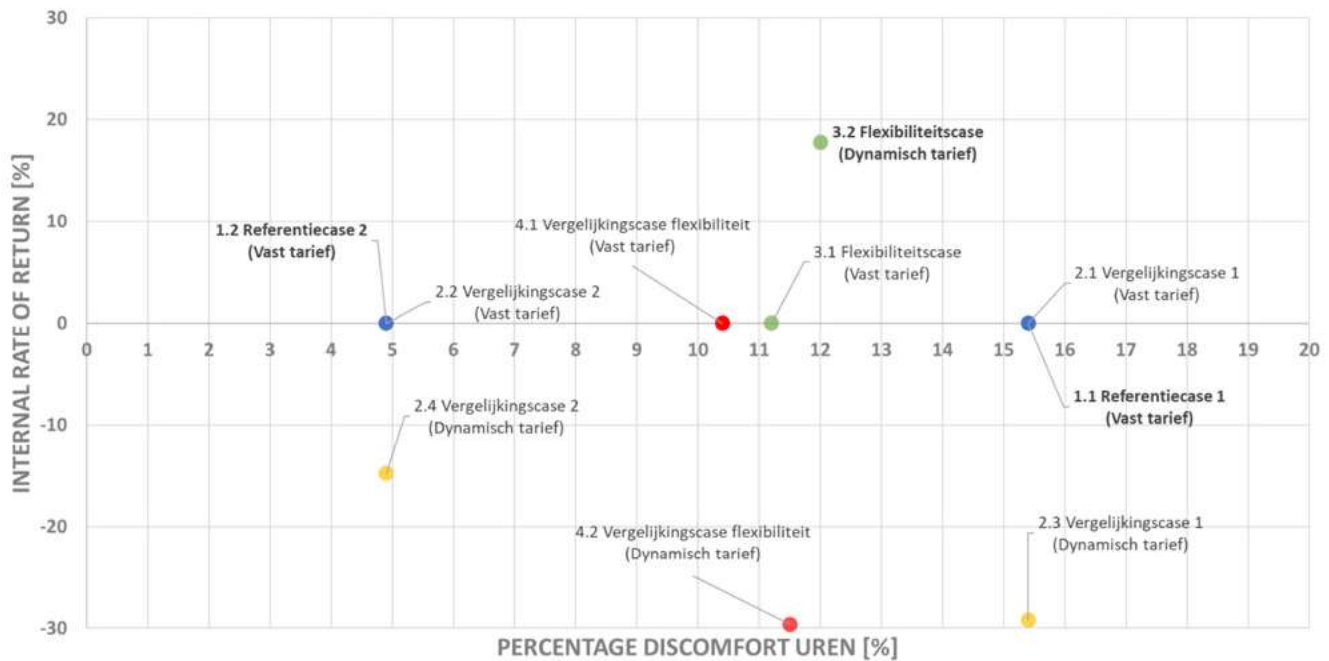
Het eindresultaat

Het uiteindelijke resultaat van dit project is de BE-FLEX-tool. Deze tool is in staat om de energieflexibiliteit te beoordelen die kantoorgebouwen kunnen bieden door het gebruik van verschillende regelstrategieën. De kern van de tool is een database met daarin het energieflexibiliteitspotentieel van een breed scala aan kantoorvarianten. Momenteel kan deze database worden doorzocht via een eenvoudig Python-script. Echter, in dit project is ook een mock-up interface voor de tool gemaakt; deze interface kan dienen als het startpunt voor verdere productontwikkeling van de tool.

Voorbeeld resultaten voor case study gebouw

Voor één van de gebouwen uit de meetcampagne worden hier in het kort enkele resultaten besproken die uit de tool komen. De resultaten worden uitgebreider besproken in het eindrapport van dit project (Peluso, 2023). De huidige gasketel wordt in dit voorbeeld vervangen door een warmtepomp. De tool rekt vervolgens verschillende cases door voor dit gebouw. De volgende cases worden onderzocht:

1. De referentiecasse: De gasketel wordt vervangen door een warmtepomp; twee conventionele regelstrategieën worden toegepast (1.1 en 1.2); in afbeelding 2 is een voorbeeld opgenomen van één van deze strategieën; er wordt gerekend met vaste elektriciteitsprijzen;
2. Een vergelijkingscasse met een PV-systeem en een batterij: De referentiecasse wordt uitgebreid met PV en een elektrische batterij; er wordt gerekend met vaste elektriciteitsprijzen (2.1 en 2.2) en dynamische elektriciteitsprijzen (2.3 en 2.4);
3. Een energieflexibiliteitscasse met comfortstrategieën: De gasketel wordt vervangen door een warmtepomp; het optimalisatie algoritme probeert de operationele kosten te reduceren door te zoeken naar de beste comfortstrategieën per dag en past op die manier de elektriciteitsvraag van het gebouw aan; er wordt gerekend met vaste (3.1) en dynamische (3.2) elektriciteitsprijzen;
4. Een vergelijkingscasse met een PV-systeem en een batterij + comfortstrategieën: de elektriciteitsvraag zoals berekend voor case 3 wordt nu toegepast op een variant met PV-systeem en een elektrische batterij; er wordt gerekend met vaste (4.1) en dynamische elektriciteitsprijzen (4.2).



Figuur 7: Voorbeeldresultaten van een gebouw. De Internal Rate of Return wordt voor verschillende cases berekend en vergeleken met het percentage discomforturen.

Per case worden verschillende prestatie-indicatoren berekend. In dit artikel wordt de Internal Rate of Return (IRR) van de investering vergeleken met het berekende thermische comfortniveau (het percentage van de tijd dat de comforteis niet gehaald wordt). Het idee hierbij is dat het beleefde comfortniveau minimaal het niveau van de referentiecasi moet halen. De IRR wordt berekend voor de investering en het onderhoud van de warmtepomp; voor cases 2 en 4 worden ook de kosten voor het PV-systeem en de elektrische batterij meegenomen.

De resultaten in de afbeelding 8 laten zien dat de IRR laag is voor de referentiecasi, dus het installeren van een warmtepomp zonder het aanpassen van de regelstrategie (1.1 en 1.2), maar sterk verbeterd door gebruik te maken van de energieflexibiliteit van het gebouw in combinatie met dynamische elektriciteitsstarieven (3.2). Het comfortniveau

bevindt zich tussen de twee referentiecasi (1.1 en 1.2). Het optimalisatiealgoritme zorgt ervoor dat het gebouw zoveel mogelijk gebruikmaakt van de elektriciteit van het net wanneer de prijzen laag zijn en de CO₂-emissies per kWh laag zijn.

Dankwoord

Wij willen TKI-Urban Energy bedanken voor de financiering van dit project (zie ook <https://projecten.topsectorenergie.nl/projecten/energy-flexibility-services-from-buildings-by-using-adaptive-comfort-strategies-35197>). Bovendien willen we de leden van het TROEF-consortium (www.troef-energy.nl) bedanken voor de prettige samenwerking.

Referenties

- Jensen, S. Ø., Marszal-Pomianowska, A., Lollini, R., Pasut, W., Knotzer, A., Engelmann, P., ... & Reynders, G. (2017). IEA EBC annex 67 energy flexible buildings. *Energy and Buildings*, 155, 25-34.
- JGoch, van, T. A. J. (2014). Connecting office buildings to the smart grid: harvesting flexibility. EngD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven.
- JMishra A. K., Loomans M. G. L. C., B. P. Group, and U. B. Physics, "Project iCare Report on the work done in TU / e, 2015-17," no. September 2017.
- JPapachristou, C. (2019). Designing a decision support tool for high performance office buildings focusing on energy flexibility: supporting decisions on thermal comfort control strategies and building design parameters. EngD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven.
- Tantawi, M. Z. (2020). Assessing Energy Flexibility using a Building's Thermal Mass as Heat Storage: a case study on demand response in office buildings retrofitted with a heat pump. MSc Thesis, Technische Universiteit Eindhoven.
- De Bruijn, R. (2021). Evaluating the potential value of energy flexibility deployment in an energy community. MSc Thesis, Technische Universiteit Eindhoven.
- Papachristou, C., Hoes, P. J., Loomans, M. G., van Goch, T. A. J., & Hensen, J. L. (2021). Investigating the energy flexibility of Dutch office buildings on single building level and building cluster level. *Journal of Building Engineering*, 40, 102687.
- Mishra, A. K., Loomans, M. G. L. C., & Hensen, J. L. (2016). Thermal comfort of heterogeneous and dynamic indoor conditions—An overview. *Building and Environment*, 109, 82-100.
- Hillman-Eady, T.C. (2022). Assessment of energy flexibility in actual buildings through the application of thermal comfort strategies and analysis of historical data. MSc Thesis, Technische Universiteit Eindhoven.
- Peluso, U. (2023). BE-FLEX: a tool to evaluate energy flexibility in office buildings through adaptive comfort strategies. EngD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven.