

PV-systemen: de oplossing voor nul-energie woningen?

Fotovoltaïsche (PV-)systemen worden steeds vaker geïnstalleerd op woningen en als oplossing gezien voor toekomstige nul-emissie gebouwen. Maar er is een probleem van gelijktijdigheid: het elektriciteitsnet wordt als virtuele opslag beschouwd, waardoor deze onconventioneel en mogelijk overbelast wordt. Een gedetailleerde 'bottom-up' modellering van het huishoudelijk elektrisch verbruik, de thermische installatie en lokale PV-productie geeft meer inzicht in de huidige en toekomstige problematiek.

Ir.-arch. R. (Ruben) Baetens en dr.ir.-arch. D. (Dirk) Saelens, afdeling Bouwfysica, Departement Burgerlijke Bouwkunde, K.U.Leuven; ir. R. (Roel) De Coninck en dr.ir. L. (Lieve) Helsen, afdeling Toegepaste Mechanica en Energieconversie, Departement Werktuigkunde, K.U.Leuven; ir. B. (Bart) Verbruggen en dr.ir. J. (Johan) Driesen, afdeling Elektrische Energie en Computer Architecturen, Departement Elektrotechniek, K.U.Leuven

Een herziening door het Europese Parlement van de richtlijn 2002/91/EG over energieprestaties voor gebouwen verplicht de EU-lidstaten om vanaf het jaar 2020 enkel nog 'bijna nul-energie' gebouwen te bouwen. Deze verplichting zal ertoe (moeten) leiden dat het aandeel hernieuwbare energie in het gebouwbestand zal toenemen om de vraag naar fossiele brandstoffen te laten dalen. Dit ondanks de onduidelijke definitie van de termen 'bijna nul-energie' en 'nul-energie' gebouwen. In een regio zoals Vlaanderen of België blijkt het gebruik van warmtepompen, zonneboilers en fotovoltaïsche (PV-)panelen hiervoor het aantrekkelijkst of meest aangewezen. In lage-energie woningen kan zo hernieuwbare energie de totale jaarlijkse energievraag dekken. Maar er ontstaat een probleem van gebrek aan gelijktijdigheid tussen de energielevering en -vraag, waarbij het elektriciteitsnet als virtuele opslag wordt gebruikt. Een hoog aandeel aan PV en/of warmtepompen kan voor een pieklevering of -vraag aan het grid zorgen. Dit kan leiden tot problemen met de stabiliteit van het elektriciteitsnet [1] binnen een korte(re)

tijdschaal. Een gedetailleerde 'bottom-up' modellering van het huishoudelijk elektrisch verbruik, de thermische installatie en lokale PV-productie geeft meer inzicht in de huidige en toekomstige problematiek.

METHODE

In het simulatieprogramma Trnsys is een multizonewoning gemodelleerd (figuur 1). De gesimuleerde woning was voorzien van een gebouwgeïntegreerd PV-systeem, een selectie van elektrische toestellen, verlichting en elektrisch gegenereerde ruimteverwarming, en een warmtepomp met opslagvat voor het sanitair warm water. Het gebruik van de elektrische toestellen en de aanwezigheid van bewoners zijn stochastisch gemodelleerd op basis van bestaande literatuur, zoals verderop in dit artikel uiteengezet.

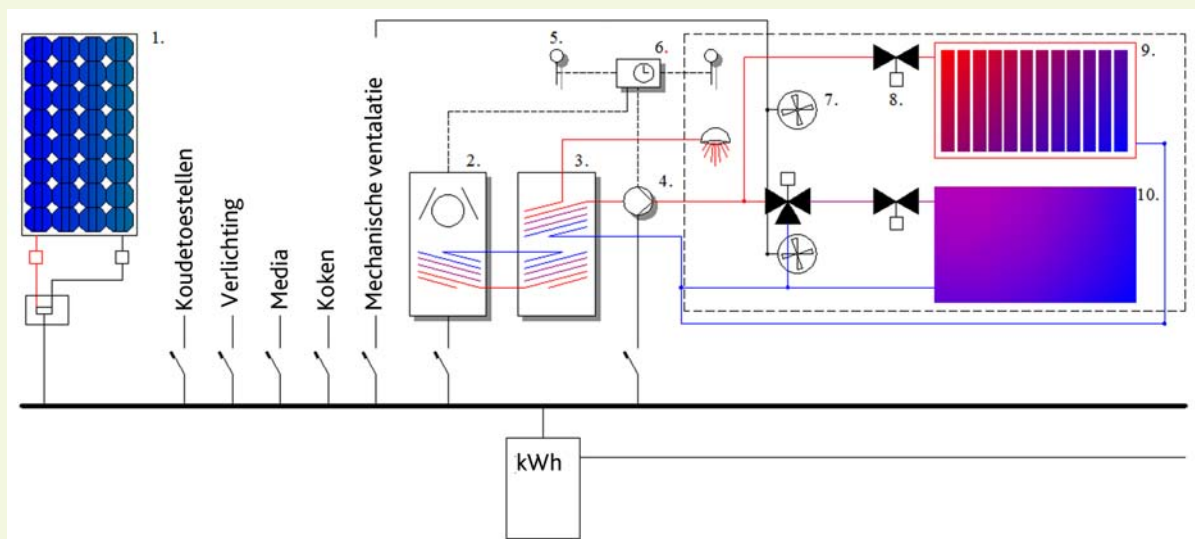
Het gebouw en zijn installaties

Een lage-energie vrijstaande woning is gemodelleerd om het profiel van de elektriciteitsvraag te simuleren (zie figuur 2). De woning is gemodelleerd als een multizonegebouw in

Trnsys [2], waarbij elke ruimte een afzonderlijke thermische zone vormt. De woning heeft een bruikbare oppervlakte van 210 m² en een dakoppervlak van 270 m².

De gebouwschil heeft U-waarden van 0,7, 0,20 en 1,7 W/(m².K) voor respectievelijk de gevel, het dak en de vensters. De woning wordt geventileerd met een mechanische balansventilatie met ventilatiedebiet van 175 m³/h. Het ventilatiesysteem is uitgerust met een warmtewisselaar met een rendement van 70%. De aan- en afvoerventilator hebben elk een vermogen van 95 W. Interne warmtewinsten van 8 W/m² door de aanwezigheid van mensen en de elektrische toestellen zijn in rekening gebracht op basis van een vereenvoudigd dag- en nachtoprofiel.

Omwille van de beperkte warmtevraag van de woning is het mogelijk om een lage-temperatuurverwarming in combinatie met een elektrische lucht-waterwarmtepomp te gebruiken voor zowel de ruimteverwarming als het sanitair warm water. De woning werd gesimuleerd met drie verschillende warmteafgiftesystemen:



-Figuur 1- Voorstelling van de gesimuleerde woning en installatie: binnen de woning zijn een geïntegreerd PV-systeem (1), een elektrische lucht-waterwarmtepomp (2) voor ruimteverwarming en sanitair warm water, een opslagtank (3), een circulatiepomp voor verwarming (4), de kamerthermostaat (6) met buitensensor (5), mechanische ventilatie (7), thermostatische kranen (8), lage-temperatuurradiatoren (9) en een vloerverwarmingssysteem (10) gemodelleerd en gesimuleerd

- vloerverwarming (FH) gedimensioneerd volgens EN 12831 en prEN 15377. De regeling gebeurt via een vloersensor en kamerthermostaat in elke ruimte. De stooklijn verloopt lineair van 43 °C tot 20 °C bij een buitentemperatuur tussen -8 °C en 20 °C;

- lage-temperatuurradiatoren (R) gedimensioneerd volgens EN 12831 en EN 422. De regeling gebeurt via thermostatische kranen. De stooklijn verloopt lineair van 55 °C tot 20 °C bij een buitentemperatuur tussen -8 °C en 20 °C;

- een combinatie (C) van vloerverwarming en lage-temperatuurradiatoren. De vloerverwarming is gedimensioneerd voor een basisverwarming van 16 °C terwijl de radiatoren de temperatuur verder optrekken tot een comfortniveau van 21 °C. De dimensionering gebeurde op basis van EN 12831, prEN 15377 en EN 422. De stooklijn verloopt lineair van 55 °C tot 20 °C bij een buitentemperatuur tussen -8 °C en 20 °C. De lagere temperaturen voor de vloerverwarming worden daarbij behaald m.b.v. een vloerwegkraan. De regeling gebeurt via een vloersensor en kamerthermostaat in elke ruimte.

De installatie voor warmteproductie bestaat uit een buffervat met een geïntegreerde warmtewisselaar voor sanitair warm water en een elektrisch aangedreven lucht/waterwarmtepomp met een nominaal vermogen van 10,0 kW en een COP van 4,26 bij nominale condities. De regeling van de warmtepomp gebeurt op basis van twee sensoren in het buffervat: (i) een sensor halverwege de tank waarbij het instelpunt gelijkgesteld is aan de stooklijn op basis van de buitentemperatuur (regeling voor ruimteverwarming) en (ii) een sensor bovenaan de tank waarbij het instelpunt gelijk is aan 50 °C (regeling voor sanitair warm water). Aan beide eisen dient tegelijk te

zijn voldaan. Stochastische afnameprofielen voor het sanitair warm water zijn gegenereerd volgens (i) het aanwezigheidsprofiel [3] en (ii) de dagelijkse waarschijnlijkheid [4] van kleine afnames, douchen en baden.

Het instelpunt voor de operationele temperatuur is gelijkgesteld aan 21 °C. De regeling van de ruimteverwarming gebeurt op basis van het stochastische aanwezigheidsprofiel [3], waarbij wordt aangenomen dat de bewoners de verwarming manueel aanzetten wanneer zij thuiskomen of opstaan. Deze aanname is gedaan om later de mogelijke verbetering door een aangepaste sturing vanuit installatie- of netwerkstandpunt te kunnen duiden.

Er is rekening gehouden met verschillende tankgroottes van 0,5 tot 4,0 m³. Vaten van deze formaten worden zelden toegepast in gelijkwaardige gebouwen. Echter, de mogelijkheid om thermische buffers te gebruiken kan een belangrijke rol spelen in de optimalisatie van gedistribueerde energieopwekking binnen slimme elektriciteitsnetwerken.

Gebruiksprofielen

Naast de elektriciteitsvraag voor ruimteverwarming, sanitair warm water en mechanische ventilatie zijn een stochastisch aanwezigheidsprofiel [3] en een stochastisch gebruiksprofiel voor het gebruik van huishoudtoestellen opgenomen. De huishoudelijke gebruikers die in rekening werden gebracht zijn het stand-by verbruik [5] en het verbruik van koelkast en diepvriezer [6], verlichting [7], het gebruik van elektrische toestellen om te koken en het gebruik van computer en televisie [8]. Voor het modelleren van verlichting is het originele model [7] gekoppeld aan de minuutwaarden van de globale illuminatie verkregen met de 'Meteonorm voor Ukkel' (België). Het gebruik van wasmachine, droogkast en vaatwasser

werd niet gemodelleerd vanwege een gebrek aan statistische gegevens van hun gebruiksprofielen.

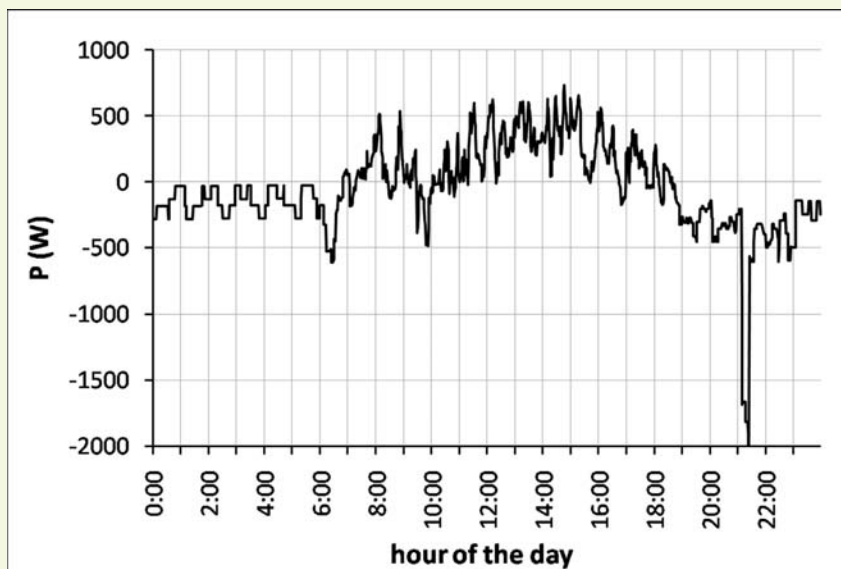
De electriciteitsgeneratie door de PV-panelen is gemodelleerd met Trnsys, type 194 [2]. De positie van de PV-panelen werd gekozen om een maximale output op jaarbasis te verkrijgen voor de klimaatdata van Ukkel (België), zijnde een inclinatie van 34° en gericht op het zuiden. Minuutwaarden voor de diffuse en directe zoninstraling op het vlak van de PV-panelen werden gegenereerd met de 'Meteonorm voor Ukkel' (België). Verschillende groottes van de PV-installatie van 1 tot 16 kWp zijn gesimuleerd.

Beperkingen randvoorwaarden en model

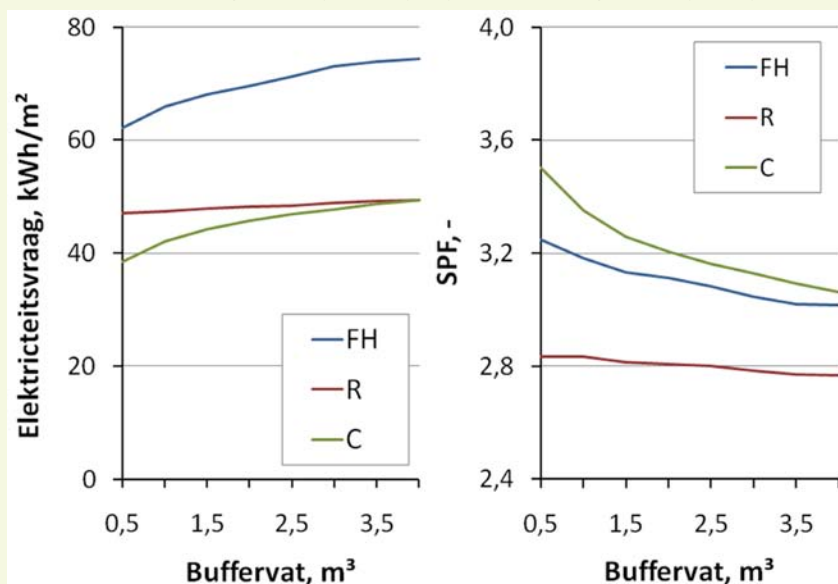
Het resulterend jaarlijks gemiddelde elektriciteitsverbruik exclusief de energievraag voor warmteproductie in de gemodelleerde woning bedraagt 2,4 MWh. Het gemiddeld jaarlijks verbruik in België bedraagt 3,5 MWh [9]. Het verschil kan verklaard worden door drie factoren: (i) de invloed van elektrisch gegenereerd sanitair warm water in de statistieken, (ii) kleinere elektrische toestellen die niet gemodelleerd zijn in dit werk en (iii) de energievraag van wasmachines en vaatwassers die een jaarlijks verbruik van 0,7 MWh met zich meebrengen [10].

ENERGIEVRAAG EN THERMISCH COMFORT

Hoewel thermisch comfort niet het onderwerp van dit werk is, moet benadrukt worden dat niet in alle situaties een gelijk niveau van thermisch comfort behaald wordt. Dit komt omdat een combinatie van verschillende verwarmingssystemen en installaties gemodelleerd zijn met eenzelfde regelstrategie. De geïmplementeerde regelstrategie zorgt



-Figuur 2- Voorbeeld van het dagprofiel van de gemodelleerde elektriciteitsbalans in het tussenseizoen. Positieve waarden duiden op een energielevering, negatieve waarden op een energievraag.



-Figuur 3- Totale jaarlijkse elektriciteitsvraag (kWh/m²) voor ruimteverwarming en sanitair warm water (links) en de resulterende seizoensprestatiefactor SPF (-) (rechts) van de warmteproductie voor de verschillende afgiftesystemen en groottes van opslagtank

ervoor dat kortstondige comfortproblemen opduiken bij de trage vloerverwarming. De gemiddelde binnentemperatuur bij aanwezigheid van de bewoners bedraagt hier 19,5 °C, waarbij deze respectievelijk 20 °C en 20,5 °C bedragen bij radiatoren of een combinatie van beide. Eveneens werd een hoger thermisch comfort vastgesteld bij het gebruik van grotere opslagvaten.

Figuur 3 toont de totale elektriciteitsvraag die varieert van 40 tot 75 kWh voor ruimteverwarming en sanitair warm water, afhankelijk van het warmteafgiftesysteem en de grootte van het opslagvat. De resulterende seizoensprestatiefactor SPF (-), gedefinieerd als de verhouding van de totaal geleverde warmte tot de elektriciteitsvraag van de warmtepomp en circulatiepomp, varieert tussen 3,5 en 2,8. De resultaten tonen een dalende SPF met stijgend tankvolume. De combinatie van vloerverwarming en radiatoren toont een hogere SPF dan een systeem met enkel vloerverwarming of

radiatoren. De reden kan gevonden worden in de lagere condensortemperaturen door een betere stratificatie in het buffervat. De langere werkingstijden voor de vloerverwarming zorgen voor hogere opslagtemperaturen doordat het buffervat steeds opnieuw gevuld wordt met water met de retourtemperatuur van de vloerverwarming. Doordat de condensortemperatuur stijgt, daalt de SPF en het thermisch vermogen. Hierdoor haalt de warmtepomp niet het gevraagde setpunt van 50 °C aan de bovenzijde van het opslagvat, waardoor water met een steeds lagere temperatuur in het vat komt en stratificatie in het vat verloren gaat.

DEKKINGSRAAD LOKALE PV-PRODUCTIE

De effectiviteit waarmee de PV-installatie de elektriciteitsvraag van het net kan laten dalen, wordt bepaald aan de hand van de dekkinggraad van het systeem. In deze context worden

de dekkinggraden γ_D en γ_S (-) gedefinieerd als 'de verhouding van de door het PV-systeem gedekte vraag tot de total productie' en 'de verhouding van de door het PV-systeem gedekte vraag tot de totale vraag':

$$\gamma_D^{[t_1, t_2]} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \min\{P_{PV}, P_D\}}{\int_{t_1}^{t_2} P_D} \quad \text{en}$$

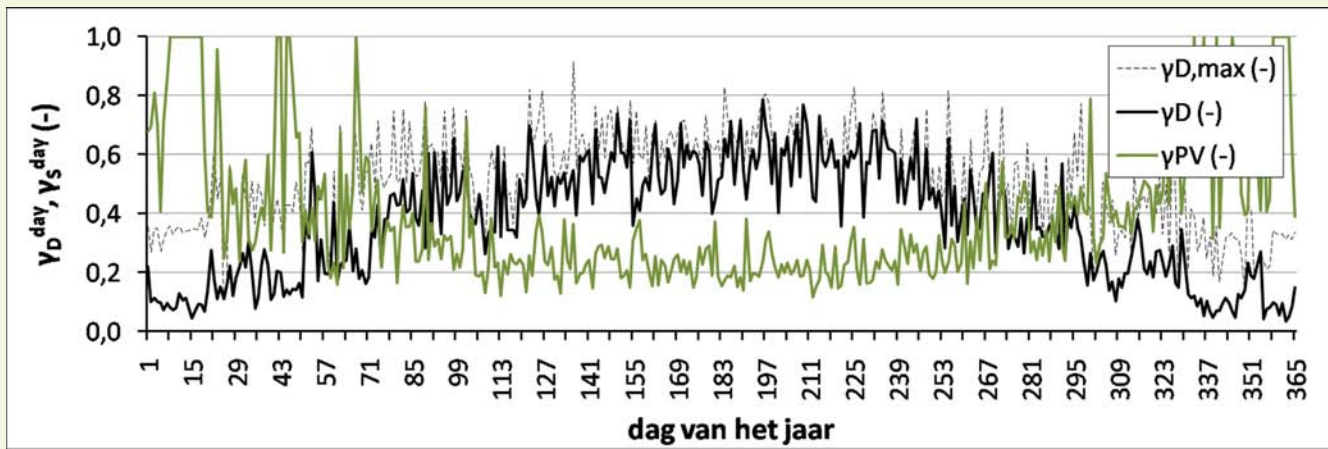
$$\gamma_S^{[t_1, t_2]} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \min\{P_{PV}, P_D\}}{\int_{t_1}^{t_2} P_{PV}}$$

waarbij P_{PV} (W) het door het PV-systeem geleverde vermogen is en P_D (W) het totaal gevraagde elektrisch vermogen. De term $\min\{P_{PV}, P_D\}$ stelt het deel van de elektriciteitsvraag voor dat rechtstreeks gedekt of geleverd wordt door het PV-systeem.

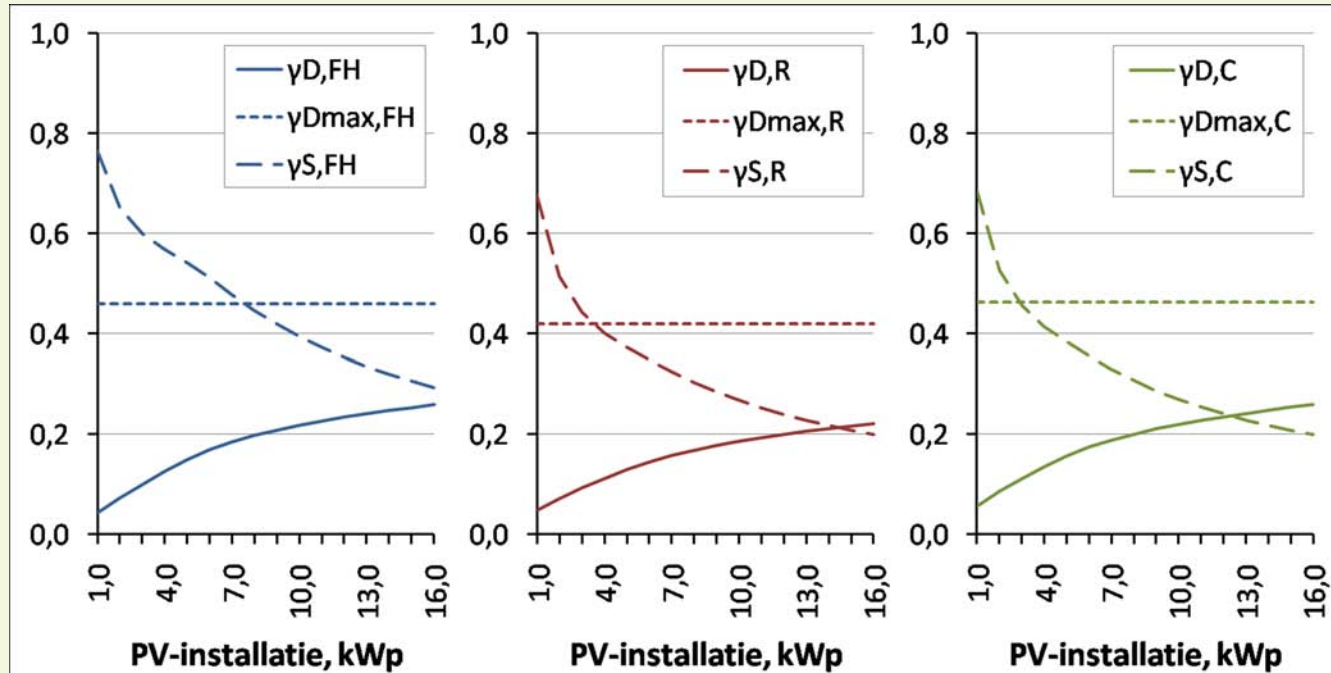
In een 'business-as-usual' situatie waarbij geen poging is gedaan om de vraag en het aanbod van het PV-systeem op elkaar af te stemmen, kan een maximum waarde $\gamma_{D,max}$ (-) worden gedefinieerd op basis van de lengte van de dag. De lengte van de dag (zijnde tussen zonsopgang en -ondergang) bepaalt de maximum periode waarin levering door het PV-systeem mogelijk is en de resulterende maximum elektriciteitsvraag die gedekt kan worden onafhankelijk van de grootte van het PV-systeem of dus 'bij een oneindig grote PV-installatie'.

Zowel γ_D , $\gamma_{D,max}$ en γ_S (-) tonen een seizoensafhankelijkheid (zie figuur 5). De seizoensafhankelijkheid van γ_D en $\gamma_{D,max}$ (-) kan worden verklaard door de lengte van de dag die wijzigt. Tijdens de winter zullen de pieken in elektriciteitsvraag in de ochtend en avond (wanneer de bewoners thuis zijn) vaak buiten de periode vallen waarin levering door het PV-systeem mogelijk is. De seizoensafhankelijkheid van γ_S (-) kan verklaard worden door hogere stralingsintensiteit op het PV-systeem in de zomer vanwege langere dagen en een hogere zonnestand.

Figuur 4 geeft eveneens aan dat – zelfs bij een nul-energie woning – zowel in de zomer als in de winter het elektriciteitsnet nodig is. Het wordt immers gebruikt als virtuele opslag om de energievraag op een ander moment van de dag of het jaar te dekken. Mogelijke gevolgen van het gebruik van het net als virtuele opslagruimte is lokale instabiliteit van het net. Vanzelfsprekend (zie ook figuur 5) heeft de grootte van het gebouwgeïntegreerde PV-systeem een grote invloed op de dekkinggraden, aangezien dit het maximale vermogen



-Figuur 4- Dekkingsgraden γ_D , $\gamma_{D,max}$ en γ_S (-) bepaald op dagelijkse basis voor een woning met radiatoren en een warmtepomp voor ruimteverwarming en sanitair warm water gedurende het jaar bij een PV-installatie van 14 kW (i.e. een nul-energie woning waarvoor de totale jaarlijkse energievraag gelijk is aan de jaarlijkse levering)



-Figuur 5- Dekkingsgraad γ_D , $\gamma_{D,max}$ en γ_S (-) voor een woning met vloerverwarming (links), lage-temperatuurradiatoren (midden) en een combinatie van beide (rechts) als functie van de grootte van het PV-systeem (kWp), wanneer een warmtepomp is gebruikt voor de warmteproductie en voor een opslagvat van 1.0 m³; de kruising van γ_S en γ_D stemt overeen met een nul-energie woning waarbij de totale jaarlijkse energievraag gelijk is aan de jaarlijkse energielevering

bepaalt dat het systeem kan leveren. De kruising tussen $\gamma_D(P_{pv})$ en $\gamma_S(P_{pv})$ – aangeduid met een pijl in figuur 5 – stemt overeen met de nul-energie woning binnen de definitie dat op jaarbasis de totaal geleverde energie gelijk is aan de totaal gevraagde energie. Het nodige ontwerpvermogen van de PV-installatie om dit te bereiken is enkel afhankelijk van de totale energievraag. Daarbij zal de resulterende dekkingsgraad sterk afhangen van het gebruiksprofiel van de bewoners, de aanwezige installaties en hun regelstrategie. De combinatie van vloerverwarming en radiatoren toont hierbij de kleinste noodzaak van een grote PV-installatie door de laagste energievraag en tegelijk ook een hogere dekkingsgraad bij nul-energie in vergelijking tot de toepassing van radiatoren. Het systeem met vloerverwarming (samen met het gebruik van huishoudelijke toestellen) toont zowel een hogere $\gamma_D(P_{pv})$ als $\gamma_S(P_{pv})$ in

vergelijking met beide andere systemen. De totale vermogensvraag gedekt door de aanwezige PV-installatie ligt een factor 1.6 hoger, zoals ook kan worden afgelezen uit de hogere γ_S met dezelfde waarde. Er zijn hiervoor twee redenen. Enerzijds kunnen dezelfde redenen die verantwoordelijk zijn voor de lagere SPF van het vloerverwarmingssysteem voor een hogere dekkingsgraad zorgen. De aangehaalde hogere condensortemperaturen verlagen het vermogen van de warmtepomp. Daardoor treden lagere elektrische vermogens en een langere, constantere (doch minder efficiënte) werking op, die beter overeenkomen met het geleverde PV-vermogen. Anderzijds wordt de stooklijn voor ruimteverwarming gedurende het gehele jaar aangehouden. Dit zorgt voor een hogere energievraag buiten het stookseizoen bij afname van sanitair warm water. De grootte van het opslagvat kan een grote invloed hebben op de dekkingsgraad van de

PV-installatie doordat deze een verschuiving van de vermogensvraag in de tijd toelaat via thermische opslag. Maar er is geen eenduidig verband merkbaar tussen de grootte van het opslagvat en de dekkingsgraad. Hierbij speelt een ander aspect een belangrijke rol, met name de regeling van de gehele installatie. Het voorzien van de mogelijkheid van thermische opslag heeft weinig tot geen effect indien dit niet gepaard gaat met een aangepaste regelstrategie van het opslagvat of de installatie. Ook mag men hierbij het aspect van de totale energievraag niet verwaarlozen: grotere opslagvaten tonen een grotere energievraag door stijgende warmteverliezen.

CONCLUSIES

Het niet gelijktijdig zijn van de elektriciteitsvraag in de woning en het aanbod van het PV-systeem resulteert in een elektriciteitsproductie die terug in het net wordt gebracht.

Daarbij wordt het elektriciteitsnet gebruikt als virtuele opslag voor de, tijdelijk overtollig, geproduceerde energie.

Deze studie toont aan dat het warmteafgifte-systeem een invloed heeft op de mogelijke synergie met het aanwezige PV-systeem. De energievraag van een traag systeem, zoals vloerverwarming, lijkt hier beter overeen te komen met de lokale PV-energielevering doordat minder pieken in de vraag worden geïntroduceerd. Maar steeds moet ook de totale energievraag en de resulterende SPF in acht genomen worden. De mogelijkheid van energieopslag in een groot buffervat heeft weinig tot geen invloed op de resultaten als deze opslagmogelijkheid niet optimaal wordt benut door een aangepaste regeling. Binnen deze studie werd de invloed van of de samenwerking met een gebouwgeïntegreerd PV-systeem in een individuele woning begroot vanuit een vereenvoudigd macro-economisch standpunt, door middel van een dekkingsgraad. Meer aandacht voor het elektrische aspect lijkt noodzakelijk om de mogelijke synergie tussen de aanwezige PV-installatie en de energievraag van een gebouw optimaal te kunnen benutten, waardoor de energievraag van het gebouwbestand vermindert. Niet enkel de dekkingsgraad maar ook (of vooral) de piekbelasting, de kwaliteit van de in het elektriciteitsnet gebrachte elektriciteit, de netspanning en -frequentie, aanwezigheid

van opslagcapaciteit, de voorspelbaarheid van lokale energielevering etc. spelen hierbij een belangrijke rol en dienen geïntegreerd te worden in modellen. Optimalisatie van gebouwen of het gebouwbestand om de energievraag te verminderen wordt zo een domeinoverschrijdend vraagstuk. De uitdaging ligt daarbij zowel op het niveau van het individuele gebouw als op wijkniveau. De resultaten van deze studie tonen aan dat verdere optimalisatie van gebouwen met lokale energieproductie voor het realiseren van een nul-energie woning een ingewikkeld multiparameter vraagstuk is dat meerdere onderzoeksdomeinen en -disciplines omvat. Ook het elektriciteitsnet tussen de verschillende gebouwen kan daarbij een belangrijke rol spelen.

■ DANKWOORD

De auteurs danken het K.U.Leuven Energieinstituut voor de financiële steun die deze studie mogelijk maakte binnen het project 'Geoptimaliseerde energienetwerken in gebouwen'.

■ REFERENTIES

1. Pepermans, G., Driesen, J., Haeseldonckx, D., Belmans, R., D'haeseleer, W. (2005). Distributed generation: definition, benefits and issues. *Energy Policy*, 33, 787-798.
2. Solar Energy Laboratory (2009). *Trnsys 16 -*

A transient system simulation program.

3. Richardson, I., Thomson, M., Infield, D. (2008). A high-resolution domestic building occupancy model for energy demand simulations. *Energy and Buildings*, 40, 1560-1566.
4. Jordan, U., Vajen, K. (2001). Realistic domestic hot-water profiles in different time scales - Final report, Marburg.
5. Almeida, A., Fonseca, P., Bandeirinha, R., Fernandes, T., Araújo, R., Nunes, U., Dupret, M., Zimmermann, J.P., Schlomann, B., Gruber, E. (2008). Remodece - Residential monitoring to decrease energy use and carbon emissions in Europe - Final report, Coimbra.
6. Firth, S., Lomas, K., Wright, A., Wall, R. (2008). Identifying trends in the use of domestic appliances from household electricity consumption measurements. *Energy and Buildings*, 40, 926-936.
7. Stokes, M., Rylatt, M., Lomas, K. (2004). A simple model of domestic lighting demand. *Energy and Buildings*, 36, 103-116.
8. Glorieux I., Vandeweyer J. (2002). Statistische studie nr110 - 24 uur ... Belgische tijd, een onderzoek naar de tijdsbesteding van de Belgen.
9. VREG (2010). *Marktmonitor 2009, 2010*.
10. Danish Energy Agency (1995). *Washing machines, Driers and Dishwashers - Final Report*.

Smitsair introduceert:

Nieuwe generatie brandkleppen



Gunstig geprijsd

Uit voorraad leverbaar

Grote effectieve doorlaat

Getest volgens EN 1366-2

Brandwerend tot EI 180 S

FID-PRO



Verkrijgbaar in:
ø100 t/m ø315 mm

FID-S



Verkrijgbaar in:
200x200 mm t/m 1200x1500 mm
ø200 t/m ø1000 mm

Meer informatie? Neem contact op met Smitsair B.V. 0297-564455, of kijk voor documentatie op smitsair.nl

Smitsair