

Een slimme koelkast voor slimme netten

De Nederlandse overheid heeft in 2010 met de kenniswerkersregeling een handreiking gedaan naar kennisintensieve bedrijven om de economische crisis het hoofd te bieden. Dit artikel bespreekt een slimme koelkast in een slim net. Deze koelkast is ontwikkeld door NXP-semiconductors [2] in werkpakket 3 van het kenniswerkersproject Building Brains [1]. De koelkast is gebaseerd op de PowerMatcher-technologie [4] van ECN [3]. De oplossing is kosteneffectief (initieel en operationeel) en gerealiseerd met bestaande NXP-chips.

Dr. ir. M.C. (Maarten) Pennings, NXP

■ TRADITIONEEL NET

Traditionele elektriciteitsnetten bestaan onder andere uit kabels en transformatoren die zorgen voor transport (hoogspanning, lange afstand) en distributie (midden en lage spanning, korte afstand) van elektrisch vermogen. Deze netten verbinden enkele grote leveranciers (bv. kolencentrales) met miljarden gebruikers (bv. koelkasten). Elektrische energie is nauwelijks grootschalig en met acceptabele verliezen op te slaan. Daarom moet bij traditionele netten het aanbod afgesteld zijn op de vraag. De primaire regeling gebruikt de 50Hz-netfrequentie. Maar daarbovenop zijn er een secundaire regeling (TenneT en APX of 'Amsterdam power exchange') en ternaire regeling (zogenoemde BRP's of *balance responsible parties* die een productie/consumptievoorspelling afgeven).

■ SLIM NET

Om problemen het hoofd te bieden worden de traditionele netten slim (*Smart Grid*) gemaakt. Er zijn vele variaties, maar wat ze gemeen hebben is het gebruik van ICT-technologie. Dit is een computerinfrastructuur naast het energienet, die het net 'beter' maakt. De verbeteringen zijn van verschillende aard. Allereerst moeten slimme netten het technische probleem van onbalans van vraag

en aanbod oplossen. De verwachting is dat de onbalans van vraag en aanbod de komende jaren toeneemt door de invoering van onvoorspelbare groene bronnen (wind, zon) en door het elektrificeren van de energieketen (verwarmen van gebouwen met een elektrisch aangedreven warmtepomp in plaats van door een gasgestookte ketel, elektrische auto's in plaats van benzineauto's). Een ander technisch probleem dat om een oplossing vraagt is de onbalans in de netbelasting (en dus bijvoorbeeld de levensduur van kabels). Deze onbalans neemt toe door de toepassing van decentrale bronnen (zonnepanelen, warmte/krachtkoppeling) op het laagspanningsnet. Maar ook economische voordelen spelen een rol bij het verbeteren van het net: besparen op reservecapaciteit (*peak shaving*: minder centrales door uitsmeren van het gebruik), besparen op bekabeling (door uitsmeren van belasting) en besparen op het uitlezen van meters voor afrekening van het gebruik. Ten slotte zijn er ook nog de politieke voordelen, zoals CO₂-reductie, gedragsverandering door gedifferentieerde tarieven en afname van de afhankelijkheid van fossiele brandstoffen.

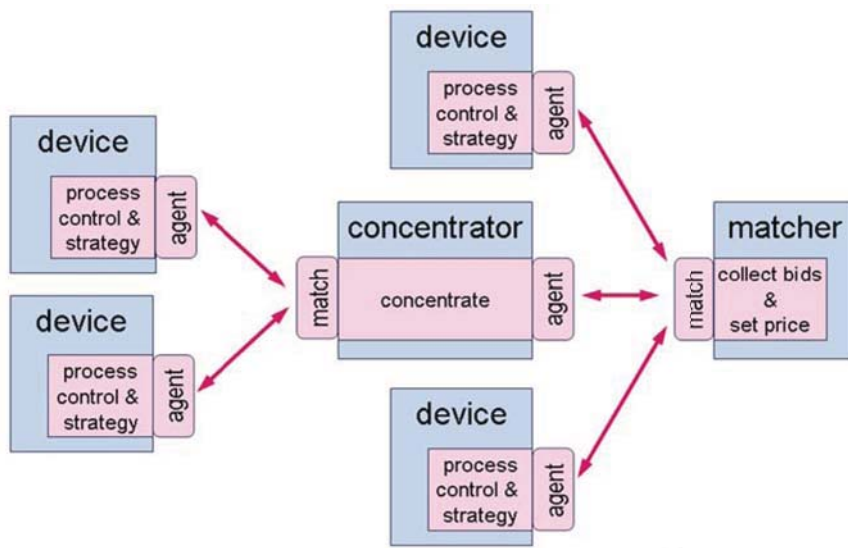
■ SCHAALBAAR SLIM

Het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN) heeft, samen met de industrie en

onderzoeksinstituten, een technologie ontwikkeld om een traditioneel net slim te maken: *PowerMatcher*. PowerMatcher is een architectuur voor energiesystemen (niet alleen elektriciteit) die een balans teweegbrengt tussen vraag en aanbod. Het legt een communicatieprotocol vast tussen apparaten (van koelkast tot kerncentrale) en realiseert zo een schaalbaar slim net. ECN heeft grootschalige simulaties gedaan, maar inmiddels ook veldtesten uitgevoerd (Hoogkerk PowerMatcher city).

■ SLIMME KOELKAST

NXP heeft de volgende stap gezet: het realiseren (*deeply embedded*) van PowerMatcher in een koelkast. De koelkast gebruikt voor zijn communicatie een eenvoudig draadloos protocol op de vrije 868MHz ISM band. De hardware is een NXP-chip (OL2381) voor op afstand bedienbare centrale deurvergrendeling van auto's en dus zeer energiezuinig. De communicatiesoftware, de PowerMatcher-logica, en de koelkastaansturing draaien op een NXP-microcontroller (LPC1114) die minder dan €1 kost [5]. Daarmee is aangetoond dat een kosteneffectieve realisatie van PowerMatcher mogelijk is. Ook de operationele kosten (*standby* verbruik) zijn erg laag.



-Figuur 1- Vier PowerMatcher-apparaten waarvan twee direct (midden-boven en onder) en twee indirect (links), namelijk via een concentrator (midden), communiceren met een matcher (rechts).

POWERMATCHER

De PowerMatcher-architectuur onderscheidt een aantal deelnemers waarvan de (*device*) *agent*, de *matcher* en de *concentrator* de belangrijkste zijn (zie figuur 1). Deze deelnemers communiceren volgens het PowerMatcher-protocol, waarbij een bod (*bid curve message*) en een prijs (*price message*) de belangrijkste berichten zijn.

Device agent

Elk PowerMatcher-apparaat (groot of klein, energie leverend of gebruikend) bevat een *device agent*. Dit is de ICT-toevoeging die het apparaat slim maakt. Voor iets grotere apparaten (warmtepomp) betekent dit wellicht alleen een software-uitbreiding op de bestaande ICT-onderdelen; voor iets eenvoudigere apparaten (afwasmachine) de toevoeging van een netwerkinterface of een microcontroller (koelkast).

De microcontroller heeft enkele functies. Ten eerste bestuurt hij het intrinsieke proces (koelen, afwassen). Daarnaast bepaalt hij de aan/uit-strategie, onder andere gestuurd door de momentane energiekosten. Ten slotte handelt hij het PowerMatcher-protocol af. Dit wil zeggen, hij verstuurt autonoom zijn biedingen en ontvangt af en toe (asynchroon) een nieuwe marktprijs.

Matcher

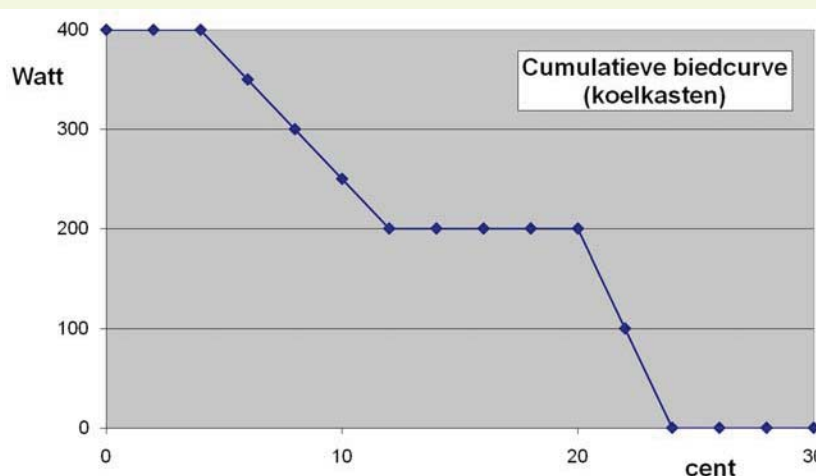
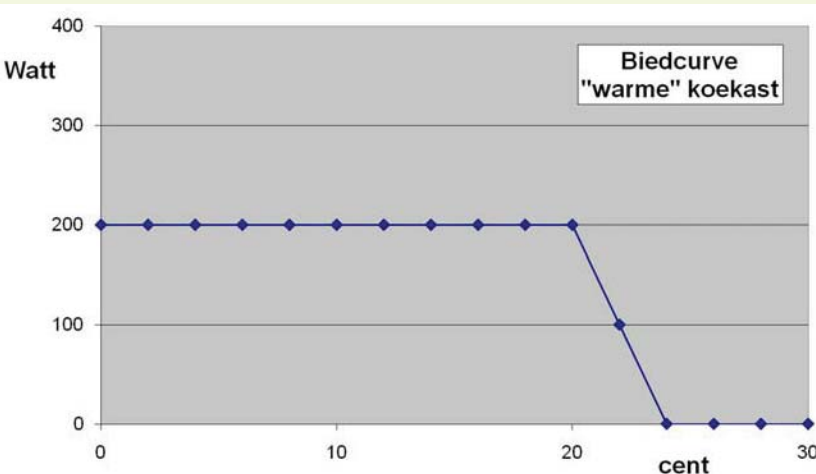
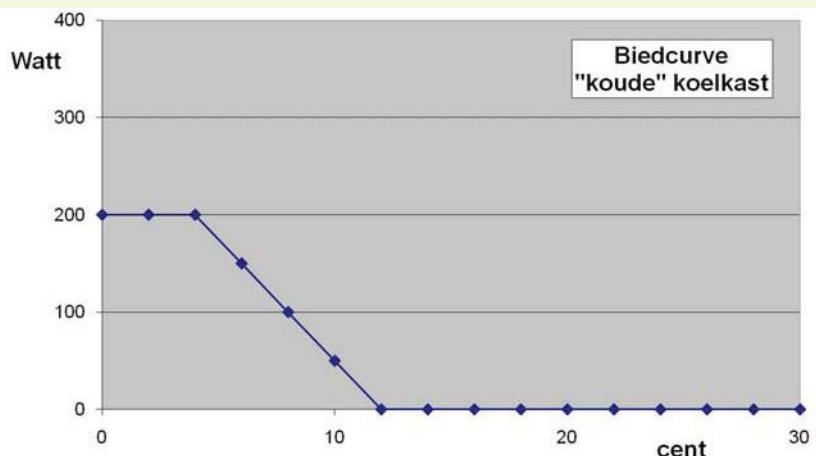
De *matcher* is de tegenhanger van de *device agent*. Een *matcher* ontvangt biedingen van vele *device agents*, bepaalt de momentane marktprijs en verstuurt die weer terug naar alle *device agents*.

Concentrator

Om op te schalen naar clusters met vele *device agents*, bestaan er *concentrators*. Een *concentrator* gedraagt zich interfacetechnisch naar een *device agent* als een *matcher*. Hij voegt de biedingen van zijn *device agents* samen en stuurt die als één bod weer uit naar zijn *matcher*. Hij gedraagt zich interfacetechnisch naar een *matcher* dus als *device agent*.

Bod en prijs

Een bod is een bericht met daarin een curve die aangeeft tegen welke prijs welk vermogen afgenomen of opgeleverd wordt. Figuur 2 laat voorbeelden zien van bidcurves en illustreert de rol van een *concentrator*, namelijk het simpelweg optellen van de binnengekomen bidcurves.



-Figuur 2- Boven een bidcurve van een koude koelkast (gaat uit bij een prijs van 12 cent); in het midden een bidcurve van een warmere koelkast (is bereid tot 24 cent te betalen). Onder het cumulatieve bod, zoals dit uit een **concentrator** komt.

De biedcurves in figuur 2 zijn voorbeelden van afnemers. Aanbieders geven ook biedcurves af en die worden ook door *concentrators* opgeteld. Een *matcher* zal, net als een *concentrator*, biedcurves optellen. Maar als extra dienst bepaalt hij het marktevenwicht door het snijpunt te berekenen en stuurt hij dat weer naar alle *device agents* (zie figuur 3).

Details

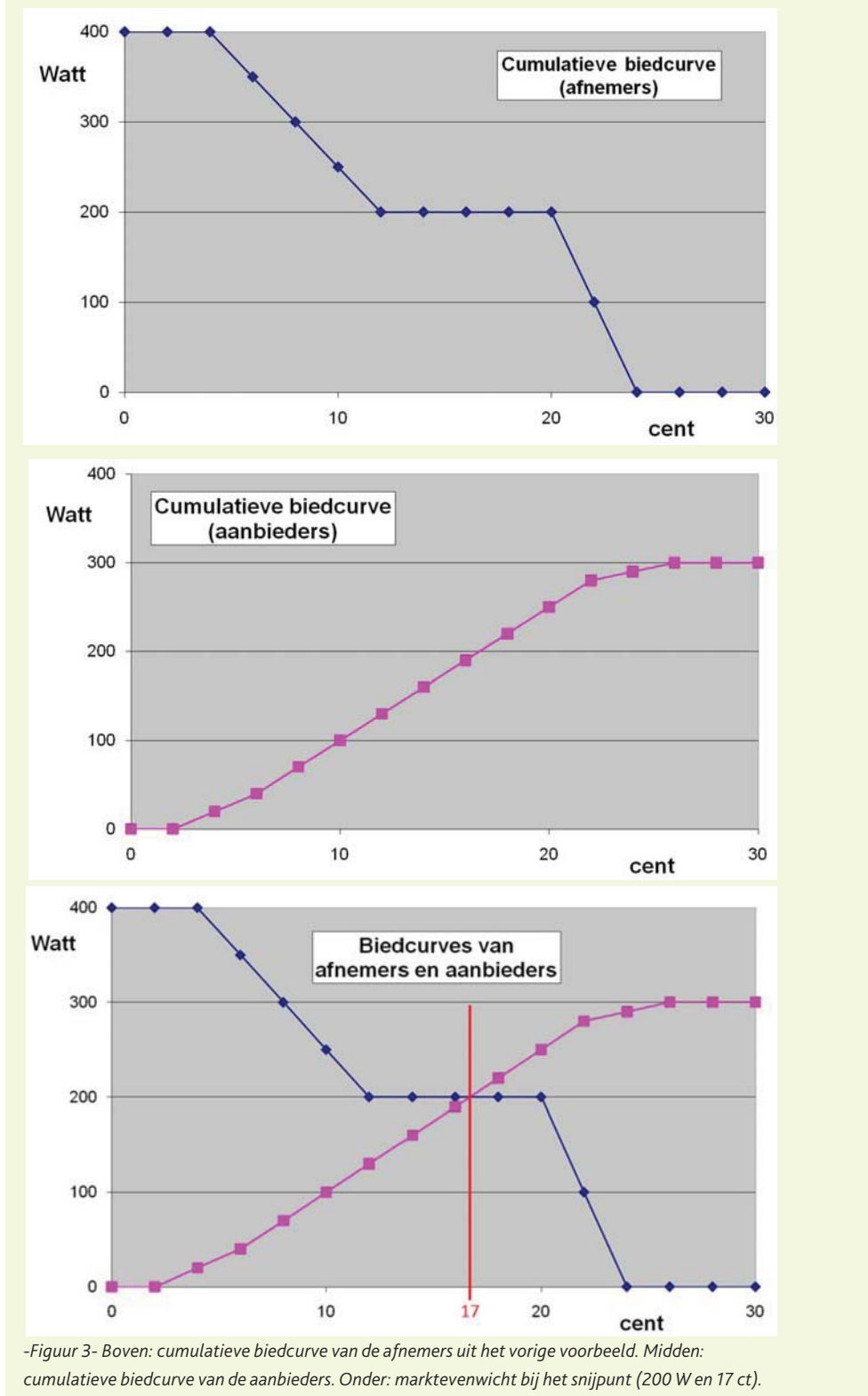
Twee deelnemers in de PowerMatcher-architectuur zijn nog niet besproken. De *network officer* zorgt ervoor dat *device agents* en *matchers* elkaar kunnen vinden. Een *objective agent* drukt een doel op aan een groep apparaten (er moet x Watt geleverd worden; er mag niet meer dan y Watt over de kabel; als mijn zonnepaneel levert, gebruik dat dan) door middel van biedcurves. Alle communicatie is asynchroon: elke *device agent* mag op elk moment een nieuwe biedcurve versturen. Ook kan er op een willekeurig moment een nieuw prijsbericht binnenkomen. De prijzen in het PowerMatcher-protocol zijn een 'bereidheids'indicatie en niet een afrekenenheid. Op dit moment is dit wettelijk niet toegestaan. De verwachting is dat op de langere termijn de prijzen wel reëel worden en er *real-time pricing* komt. Ten slotte moet opgemerkt worden dat de huidige PowerMatcher een coöperatief (op vertrouwen gebaseerd) systeem is. Er is geen netwerkpolitie die een *device agent* bestraft als hij zich niet aan zijn bod houdt. Er is geen cryptologie voorzien en er zijn geen maatregelen die genomen kunnen worden tegen onweerlegbaarheid (*non-repudiation*) of identiteitsvervalsing (*spoofing*). Dit is logisch in de experimenteerfase, maar de verwachting is dat bij een grootschalige uitrol dergelijke maatregelen wel toegevoegd worden.

SLIMME KOELKAST

Demonstratiemodellen zoals de PowerMatcher-koelkast die NXP binnen Building Brains heeft ontwikkeld, zijn eerder gemaakt. Maar deze koelkast is voorzien van een kosteneffectieve ICT-component in tegenstelling tot bijvoorbeeld een pc-oplossing.

Hardware

Er is uitgegaan van een standaard koelkast, voorzien van een netspanningsmodule (230V), besturingsmodule en sensormodule (figuur 4). De sensormodule meet de temperatuur in de koelkast. Deze is verbonden met de besturingsmodule, die is voorzien van een kleine microcontroller (LPC1114, 32k flash, 8k ram) en een communicatiechip (OL2381), beide van NXP. Deze module realiseert de besturing van de koelkast (houdt het interieur koel, maar niet te koel; zorgt dat de compressor niet



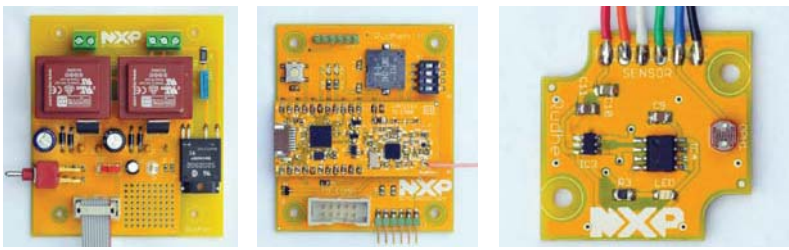
-Figuur 3- Boven: cumulatieve biedcurve van de afnemers uit het vorige voorbeeld. Midden: cumulatieve biedcurve van de aanbieders. Onder: marktevenwicht bij het snijpunt (200 W en 17 ct).

te lang aan staat), bepaalt de prijsstrategie, reageert op prijsberichten van de *matcher* en verstuurt via zijn draadloze link periodiek de toestand van de koelkast (bijvoorbeeld voor een dashboard of een datalogger). De besturingsmodule is verbonden met de netspanningsmodule. Deze bevat niet alleen de 230V-naar-5V-transformator, maar ook de galvanisch gescheiden aansturing (*solid state* relais) voor de compressor.

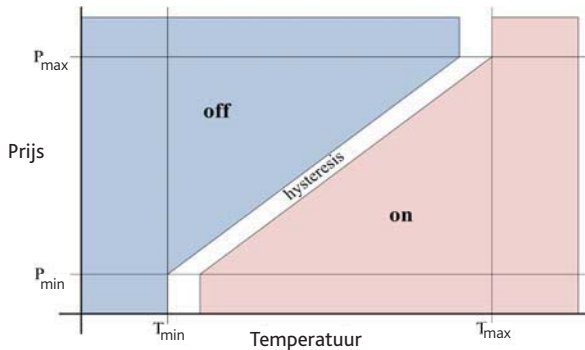
Regelalgoritme

De koelkast heeft drie standen. De eerste

stand, *native*, wordt mechanisch gekozen door een schakelaar op de netspanningsmodule. In de *native*-stand werkt de originele analoge regeling. Van de besturingsmodule is alleen het meet- en verstuurgedeelte actief. De *native*-stand is vooral handig om referentiemetingen aan de originele besturing te kunnen doen. Wordt de schakelaar op de netspanningsmodule omgezet, dan staat de koelkast in de tweede stand: *smart*. De koelkast is nu een slimme koelkast, onderdeel van PowerMatcher. Is er gedurende langere tijd geen verbinding met PowerMatcher (*con-*



-Figuur 4- Van links naar rechts de netspanningsmodule, besturingsmodule en sensormodule



-Figuur 5- Strategie van de slimme koelkast: compressor aan, tenzij de koelkast koud is of de prijs hoog

centrator, matcher), dan vervalt de koelkast in de stand *traditional*. De besturingsmodule imiteert de *native*-besturing tot er weer PowerMatcher-communicatie is. De strategie in de *smart*-stand is op dit moment relatief eenvoudig. De koelkast heeft een richttemperatuur T_{setpoint} en mag daarom regelen tussen T_{min} en T_{max} die daaromheen liggen. Hoe groter het interval ($T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$) dat toegestaan wordt, hoe groter de speelruimte om de warmtecapaciteit te benutten, en dus lage PowerMatcher-prijzen. Er is een bandbreedte voor de prijs P_{min} en P_{max} . De twee punten $T_{\text{min}}, P_{\text{min}}$ en $T_{\text{max}}, P_{\text{max}}$ definiëren de scheidslijn. Boven die lijn is de koelkast koud genoeg en/of de prijs te hoog, dus de compressor is uit. Onder die lijn is de koelkast te warm en/of de prijs laag genoeg, dus de compressor mag aan. In figuur 5 is te zien dat er nog een hysteresis-zone is toegevoegd.

Communicatie

Het is vooral in bestaande woningen niet praktisch en daardoor niet haalbaar als slimme apparaten naast de 230V-aansluiting ook nog een netwerkaansluiting nodig hebben. UTP valt dan af (standaard bedraad internet). Wat overblijft, is *power line communication* (internet via het stopcontact) of draadloze oplossingen (WiFi, ZigBee). Er is gekozen voor een draadloze RF-verbinding op de 868MHz ISM band. Deze band is nog relatief leeg, in tegenstelling tot de 2.4GHz band waar WiFi en ZigBee op zitten. Bovendien is het bereik wat groter. Gebruikt is een chip (OL2381) die in autosleutels zit om op afstand de centrale deurvergrendeling te bedienen. Voor de demonstraties is een eenvoudig eigen protocol ontwikkeld (*light-weight* PowerMatcher over RF). Dit gebruikt telegrammen van 18 bytes: 4 bytes voor de *header*, 4 bytes voor de adressering, 8 bytes *payload*,

en 2 bytes voor de *checksum*. De slimme koelkast gebruikt drie type telegrammen. De eerste is koelkast specifiek, niet strikt nodig en niet gerelateerd aan PowerMatcher: *Fridge Statereport*. De koelkast stuurt dit telegram periodiek en bij veranderingen. Het bevat de status van de koelkast: hoeveel vermogen hij opneemt (dat wil zeggen of de compressor aan of uit staat), wat de interne temperatuur is en of de deur open is. Verder gebruikt de koelkast twee generieke PowerMatcher-telegrammen: *PowerMatcher Price* en *PowerMatcher Bid*. Het prijstelegram bevat de prijs in millicenten. Het biedtelegram bevat een biedcurve. Vooral hier is een vereenvoudiging toegepast op de bestaande PowerMatcher-berichten: de curve wordt vastgelegd door slechts twee punten. Dat is overigens meer dan een koelkast nodig heeft, omdat de koelkast alleen aan of uit kan zijn en zijn biedcurve dus een stapfunctie is.

Overige componenten

Op dit moment is de slimme koelkast de enige pc-loze component in het demonstratiesysteem (zoals geschetst in figuur 6). Er is een pc (*dashboard*) toegevoegd om de slimme koelkast te demonstreren en te monitoren. Een tweede pc (PowerMatcher) heeft een dub-

belrol. Ten eerste vertaalt hij PowerMatcher over RF naar PowerMatcher over Ethernet. De tweede functie is het draaien van een gesimuleerde PowerMatcher omgeving.

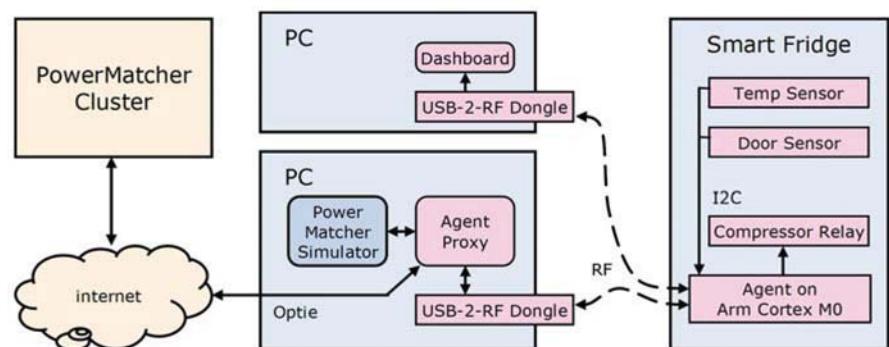
VOLGENDE STAPPEN

Met dit demonstratiesysteem is aangetoond dat tegen geringe meerkosten een apparaat onderdeel kan worden van PowerMatcher. Gaat dit ook op voor een compleet huis? De bedoeling is nu om een tweede apparaat toe te voegen. Daarbij wordt gedacht aan een zonnepaneel, waarmee dus zelfs een energieleverancier wordt geïntroduceerd. De PowerMatcher-pc zou dan vervangen worden door een *smart bridge*. Dit is een al ontwikkelde component, gebaseerd op een LPC1768 microcontroller (512k flash, 64k ram) met een ethernet-interface en een RF-interface (OL2381). Het plan is om van de *smart bridge* een *Home Energy Box* te maken: conversie van PowerMatcher over RF naar PowerMatcher over ethernet, PowerMatcher *concentrator*, PowerMatcher *network officer*, PowerMatcher *objective agent* om stroom van het zonnepaneel voorrang te geven, plus een (web) interface om een dashboard te kunnen maken op een pc of iPhone.

Een zorg is nog het coöperatieve karakter van PowerMatcher. Voor grootschalig uitgerolde consumentenproducten die geld gerelateerd zijn, lijkt een coöperatief model gevaarlijk. Dit betekent dat alle slimme apparaten een versleutelingsmodule (*crypto*) moeten hebben (met de bijbehorende problemen van installatie). Ook moeten ze robuuster worden i.v.m. het wegvallen en opkomen van de PowerMatcher-verbinding. Wellicht dat de *Home Energy Box* ook een *secure element* moet hebben voor een eenduidige identificatie en veilige *crypto*.

REFERENTIES

1. www.buildingbrains.eu
2. www.nxp.com
3. www.ecn.nl
4. www.powermatcher.net
5. www.standardics.nxp.com/microcontrollers



-Figuur 6- Het gehele demonstratiesysteem