



Antoine Freijters, PWN

Martin Klein Arfman, PWN

Jørgen Best, Witteveen+Bos

Volautomatische ‘anticiperende’ distributieregeling bij PWN

Drinkwaterbedrijf PWN werkt sinds kort met een zogeheten anticiperende volautomatische distributieregeling. Anticiperend houdt in dat kennis van het specifieke distributieproces van PWN, hydraulische kennis, kennis van pompen en regeltechniek gecombineerd is tot een robuuste distributieregeling. De regeling zorgt ervoor dat het afgenomen water nauwkeurig verdeeld wordt over de verschillende pompstations, een constante druk in het distributienet wordt gehandhaafd en drukschommelingen als gevolg van het bij- en afschakelen van pompen volledig weggevoerd worden.

In het grootste deel van de provincie Noord-Holland ontbreekt het aan duurzame grondwaterbronnen voor de eenvoudige productie van drinkwater. PWN is daarom aangewezen op groot-schalige productie van drinkwater uit oppervlaktewater. De locatie van de bronnen (IJsselmeer en Rijn) en de duinen voor het infiltratieproces, gecombineerd met het streven naar efficiënte zuiveringsfabrieken (in verband met schaalvoordelen) leidde ertoe dat PWN over een beperkt aantal grote zuive-

ringsstations beschikt. Automatisch volgt hieruit dat de voorzieningsgebieden ook groot zijn. Om leveringszekerheid richting de klant te waarborgen, leveren minimaal twee pompstations drinkwater op de grote voorzieningsgebieden, hetgeen resulteert in een complex transport- en distributieproces, waarbij pompstations elkaar beïnvloeden.

In 2005 is PWN overgegaan van handmatige bedrijfsvoering op een volautomatische bedrijfsvoering volgens Plenty¹. Voorheen

werd de inzet van productiemiddelen en de druk in het net handmatig geregeld door de bedrijfsvoerder. Nu verloopt dit volledig automatisch. Het afgelopen jaar is het transport- en distributieproces nauwkeurig geëvalueerd en geoptimaliseerd. Dit resulteerde in een nieuwe volautomatische anticiperende distributieregeling.

Voor het ontwerpen van de nieuwe distributieregeling zijn de volgende uitgangspunten geformuleerd:

- Drukschommelingen kunnen leiden tot leidingbreuken. Ze kunnen onder andere ontstaan ten gevolge van een wijzigende afzet, bij het op- en afvoeren van pompen en bij het in- en uitschakelen van pompen. Daarnaast geldt dat door de dynamiek in een voorzieningsgebied een gewenste druk in het net door de regeling nooit exact gehaald wordt. De regelaar zal rond de drukwenswaarde schommelen. Als pompstations elkaar beïnvloeden, kunnen deze schommelingen groter worden. Als de regeling te ver doorschiet en de schommelingen steeds groter worden, is sprake van regelinstabiliteit en kunnen onaantvaardbaar hoge (en lage) drukken optreden. Juist het onder alle omstandigheden moeten beheersen van de regelingen maakt dit aspect complex;
- In de grote voorzieningsgebieden van PWN bestaat een grote variatie tussen leveringssituaties bij hoog- en laagverbruik. Uiteindelijk is het streven om in alle leveringssituaties overal een aanvaardbare druk te verkrijgen en drukschommelingen bij klanten te minimaliseren. Bij hoogverbruik zijn af pompstation hoge drukken benodigd. 's Nachts bij laagverbruik kan

Een leidingbreuk.



volstaan worden met lagere drukken. Nog los van energieverstopping was bij de grote voorzieningsgebieden geen druk af pompstation in te stellen die zowel 's nachts voldoende laag als overdag voldoende hoog was. Gekozen is om te gaan regelen op maatgevende punten in de voorzieningsgebieden, ver verwijderd van de pompstations (zie het kader voor een sterk vereenvoudigd model van de opzet in een voorzieningsgebied);

- Op basis van een etmaalprognose wordt per pompstation volgens een van te voren bepaald leveringspercentage een hoeveelheid drinkwater geproduceerd in 24 uur. Om ervoor te zorgen dat aan het einde van elk etmaal deze pompstations de door hun geproduceerde hoeveelheden hebben geleverd, dient het distributieproces in dezelfde 'verhouding' plaats te vinden als het productieproces. Plenty Control verdeelt de geprognosticeerde productie over de verschillende productielocaties. Het transport van drinkwater moet in dezelfde verhouding plaatsvinden. Dit wordt gerealiseerd door deze pompstations op kwartierbasis in een onderling vaste verhouding water te laten distribueren. Dit heeft als extra voordeel dat in pendelgebieden, waarin verschillende waterkwaliteiten kunnen mengen, veranderingen van stromingsrichting worden geminimaliseerd en dat de reinwaterkelders evenredig worden belast. Hierbij is een pompstation verantwoordelijk voor het in stand houden van de druk en is het/de andere pompstation(s) alleen verantwoordelijk voor de levering van zijn opgegeven percentage.

De nieuwe distributieregeling

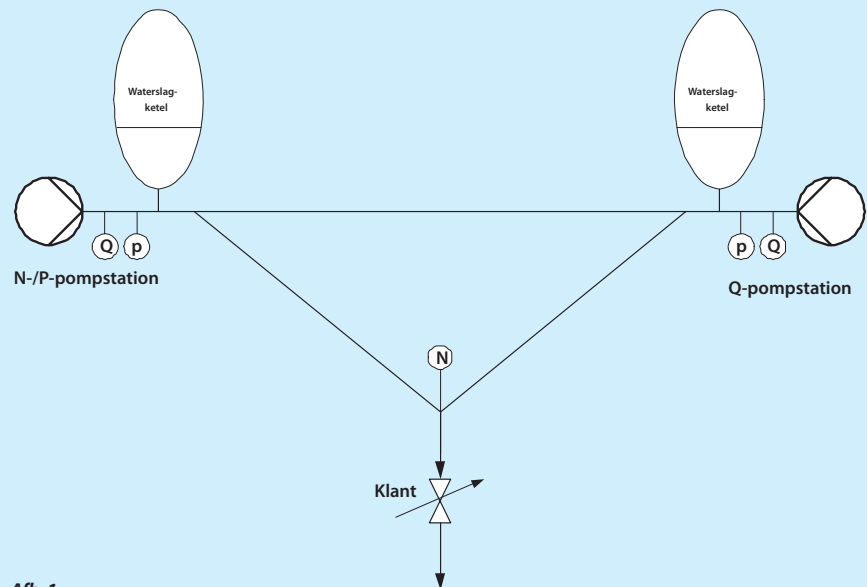
De hier beschreven distributieregeling kan in principe in bestaande procesautomatisering worden ondergebracht en vergt dus geen separate hardware, zoals een industriële PC.

Omdat gebruikelijke regeltechnische oplossingen niet leiden tot het gewenste resultaat, is de nieuwe distributieregeling ontworpen. Deze voorziet onder meer in het regelen op basis van netdruk, het stootloos overschakelen en het gelijkmatig verdelen van fluctuaties in het voorzieningsgebied.

Het regelen op basis van netdruk

Op een maatgevend punt in het voorzieningsgebied wordt de druk op een constante waarde geregeld. De fysieke afstand van de pompstations alsmede de dempende werking van waterslagketels maakt dat de netdruk sterk vertraagd reageert op het op- en aftoeren van pompen. Het gevolg is dat, zonder tegenmaatregelen, een regeling neigt naar doorschieten. Zolang de regeling de aangepaste druk nog niet heeft gezien, zal de pomp immers verder worden op- of afgetoerd. Om dit doorschot (regelinestabiliteit) te voorkomen, zou een zeer trage regeling noodzakelijk zijn. Zo'n regeling kan in de grote voorzieningsgebieden van PWN de steile ochtendpieken niet volgen. De wederzijdse beïnvloeding van de verschillende pompstations verergert de problematiek verder. Om toch goed te kunnen regelen, is de anticiperende netdrukregeling ontworpen.

Onderstaand is schematisch een voorzieningsgebied met twee pompstations gegeven: één pompstation wordt op netdruk (in het voorzieningsgebied) of persdruk (bij het pompstation) geregeld; de andere(n) op debiet (Q). Afhankelijk van de weerstand in de verschillende leidingen bevinden de pompstations zich in een meer parallelle configuratie (bovenste schematische verbinding heeft dan een lage weerstand) of tegen over elkaar (bovenste schematische verbinding ontbreekt of heeft een hoge weerstand). De afstand tot de klant, de aard van de regeling (netdruk of persdruk) en onderlinge configuratie beïnvloeden wederzijdse verstoring en het regelgedrag.



Afb. 1.

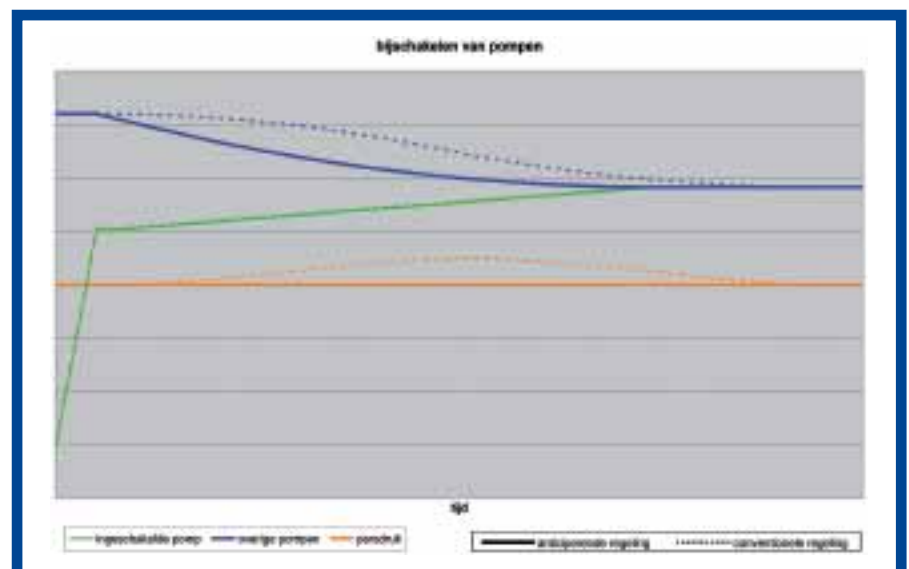
Door de actuele netdruk (in het voorzieningsgebied) en de persdruk (af pompstation) te vergelijken, kan bij benadering berekend worden hoever, direct in één stap, de pompen moeten worden bijgestuurd om de gewenste druk in het voorzieningsgebied te handhaven. Een zeer rustige 'klassieke' regeling zorgt voor fijn regelen. Door het anticiperende karakter van deze gecombineerde regeling en sturing ontstaat een zeer robuuste en snelle netdrukregeling.

Het stootloos overschakelen bij het bij- of afschakelen van pompen

Het inschakelen van een extra pomp leidt,

zonder maatregelen, altijd tot een zekere drukpiek (zie afbeelding 2). Pas als de extra pomp een bijdrage levert en de druk boven de wenswaarde heeft gestuwd, zal de regeling de reeds draaiende pompen gaan aftoeren. Deze drukschommelingen verstoren de distributieregeling en vormen een potentieel risico op regelinestabiliteit met extreme drukpieken tot gevolg. Om gegarandeerd zonder drukstoten de pompen voldoende snel bij- en af te kunnen schakelen, is een stootloze pompoverschakeling ontworpen. De reeds in bedrijf zijnde pomp(en) anticiperen op een bij geschakelde extra pomp door op het juiste moment met

Afb. 2.



het juiste snelheidsverloop af te toeren. Om het juiste verloop te bepalen, is kennis van pomp- en regeltechniek gecombineerd. Het resultaat is een volledig stootloze overgang zonder verstoring van druk, debiet en regeling. Tijdens het overschakelen kan de distributieregeling zodoende ongestoord en ononderbroken doorgang vinden. De gehele procedure duurt maximaal enkele minuten.

Het gelijkmatig verdelen van fluctuaties in het voorzieningsgebied

Het is noodzakelijk dat de verschillende pompstations in een door Plenty Control opgelegde vaste verhouding water distribueren. Om dit te bereiken regelt één pompstation de druk en de andere pompstation(s) leveren een percentage van de totale actuele de vraag in het distributiegebied. Dit percentage komt overeen met de verdeling van de prognose over de verschillende pompstations. Dit debiet wordt ieder kwartier aangepast (P/Q-regeling). Het probleem dat zich daarbij kan voordoen, is dat de debiet- en drukregelingen elkaar af en toe versterken en af en toe juist tegenwerken. Het resultaat is dat de regeling van het totale voorzieningsgebied, onder specifieke omstandigheden, instabiel dreigt te worden met drukpieken als gevolg.

Om toch pompstations gegarandeerd stabiel op debiet te kunnen regelen, wordt een anticiperende debietsturing toegepast. De debietsturing rekent op basis van de bekende pompeigenschappen en opgegeven wenswaarden en systeemparameters uit hoeveel pompen met welk toerental moeten draaien om uiteindelijk het gewenste debiet te verkrijgen. Dit betekent dat zelfs als het op druk geregelde pompstation nog niet de juiste druk heeft

bereikt de op debiet geregelde pompstations al met het uiteindelijk benodigde toerental draaien. Een zeer rustige klassieke regeling zorgt voor fijn regelen om zo nauwkeurig mogelijk het gewenste debiet te behalen. Het resultaat van de anticiperende debietregeling is dat de verschillende regelingen (druk en debiet) in het distributiegebied elkaar gegarandeerd niet meer verstoren.

Bovenstaande voorbeelden van de functionaliteit van de anticiperende volautomatische distributieregeling van PWN laat zich niet implementeren met de tot nu toe gebruikelijke regeltechniek. Deze houdt rekening met bekend systeemgedrag en is gerealiseerd door het combineren van hydraulica, pomptechniek en regeltechniek.

Uitwerking van specifiek toegepaste regeltechniek

Netdrukregeling met adaptatie

Het probleem bij netdrukregelingen is de gevoeligheid voor instabiliteit (dus risico op regelinstabiliteit en schade of het slecht handhaven van de druk in het voorzieningsgebied). Door rekening te houden met het hydraulische gedrag en pompeigenschappen is een stabiele regeling mogelijk. De netdrukregeling met adaptatie anticipeert op de volgende wijze op het systeemgedrag:

- De opvoerhoogte van een pomp varieert bij benadering kwadratisch met het toerental van de pompen. Door worteltrekken over de uitgang van de regeling wordt een min of meer lineaire relatie tussen de aansturing van de netdrukregelaar en de druk verkregen. Een regelaar functioneert veel beter bij een lineair verband. Deze maatregel is zeker ook voor andere regelingen inzetbaar;

- De verhouding tussen de druk af pompstation en de gemeten netdruk is een maat voor de verhouding tussen de hydraulische verliezen vanaf het pompstation en de hydraulische verliezen vanaf het netdrukmeetpunt. Willen we de netdruk op een bepaald niveau handhaven, weten we op basis van deze verhouding met hoeveel we de druk af pompstation moeten verhogen. Omdat we de relatie tussen de druk en het toerental van de pompen kennen (zie vorige punt) weten we ook met hoeveel we de uitgang van de regelaar moeten verhogen om de bekende drukverhoging af pompstation (en daarmee samenhangende netdrukverhoging) te bewerkstelligen. Deze laatste correctie op de uitgang van de regelaar heet adaptatie van de regelaar.

Samenvattend: een toename in vraag zal leiden tot een daling in netdruk en het verschuiven van besproken verhouding, op basis waarvan de uitgang van de regelaar vrijwel 'instantaan' gecorrigeerd kan worden. Het corrigeren van de uitgang van de regelaar op basis van deze verhouding heet adaptatie. Wat resulteert is een regelaar die door lineariteit en adaptatie weinig te doen heeft en dus zeer rustig en stabiel kan worden ingesteld.

In- en uitschakelen van pompen

In een distributieregeling met toerengeregelde pompen wordt de druk geregeld door aanpassing van het toerental. Als een extra pomp wordt bijgeschakeld, zal de druk ongewenst toenemen doordat de ingeschakelde pomp een extra bijdrage levert. De regelaar zal deze toegenomen druk (te langzaam) corrigeren. Het gevolg is een drukstoot die de regelingen van andere pompstations beïnvloedt. De bijgeschakelde pomp wordt pas opgenomen in de regeling nadat hij een bijdrage levert, wat dus altijd resulteert in een piek in de druk.

Een pompoverschakeling zonder drukstoten is te bereiken door de pompen die reeds in bedrijf zijn en in de regeling zitten, gecontroleerd omlaag te toeren. Dit kan dusdanig dat het effect van een optoerende pomp vrijwel volledig wordt gecompenseerd door het gecontroleerd aftoeren van de reeds draaiende pompen. Of anders gesteld: de regelaar gaat onveranderd door met regelen, de druk blijft constant doordat het effect van de bijgeschakelde pomp volledig wordt gecompenseerd in een tussenliggende functie.

Om zonder drukstoten te kunnen overschakelen, moeten twee vraagstukken worden opgelost:

- Bij welk toerental begint de ingeschakelde pomp een bijdrage te leveren (wordt er water verpompt)? Aangezien een kwadratisch verband bestaat tussen toerental en druk, kan dit punt berekend worden met een tweedegraads vergelijking;
- Volgens welke relatie moeten de reeds in bedrijf zijnde pompen teruggenomen worden? Aangezien pompcurves goed te benaderen zijn met een tweedegraads vergelijking en de actuele opvoerhoogte

Gebruikelijke regeltechnische oplossingen

In de in distributieregelingen gebruikte regeltechniek wordt een proces meestal als blackbox benaderd. Gesimplificeerd komt het gedrag van de regelaar er op neer dat hij op basis van een verschil tussen een gewenste waarde en gemeten waarde de pomp met kleine stapjes bijstelt. Bij het instellen van regelaars wordt nagegaan hoe het proces reageert op een verandering in toerental en op basis daarvan of met op goed geluk worden de regelparameters (onder andere de grootte van stapjes) ingesteld.

Als zich in de regeling complicaties voordoen, moeten compromissen worden gesloten. Voorbeelden hiervan zijn:

- Om meerdere pompstations op een voorzieningsgebied te kunnen bedienen, wordt meestal één pompstation op druk bedreven. De overige pompstations worden op een vast debiet bedreven. Het gevolg is dat alle variaties in vraag volledig door het druk geregelde pompstation moeten worden opgevangen. Hierdoor zal in een ochtendpiek het druk geregelde pompstation verhoudingsgewijs veel water leveren en kunnen in het voorzieningsgebied grote pendelgebieden ontstaan waar de stromingsrichting zich omkeert en de lokale verblijftijden fors kunnen toenemen. Aantrekkelijker zou zijn als de fluctuaties gelijkmatiger zouden worden verdeeld. Dit leidt zowel tot een gelijkmatiger productie als tot reductie van transportverliezen, minder overcapaciteit in reinwaterberging en een makkelijker verdeling van de vraag over in te zetten productiemiddelen;
- Als de regeling onrustig is (druk schommelt), wordt de onrust bestreden door de regeling trager te maken. Deze traagheid leidt er echter toe dat de regeling veranderingen in vraag en druk slechts traag kan volgen. Om een bij toenemende vraag dalende druk op te vangen, wordt vervolgens vaak de drukwenswaarde verhoogd;
- De druk in het leidingnet wordt bepaald door de druk bij het pompstation verminderd met de hydraulische verliezen, die verliezen variëren over de dag. Overdag optredende grote hydraulische verliezen worden opgevangen door overdag het pompstation op een hogere druk te bedrijven dan 's nachts. Het schakelen in druk geschiedt al dan niet handmatig.

bekend is, is ook dit vraagstuk wiskundig oplosbaar.

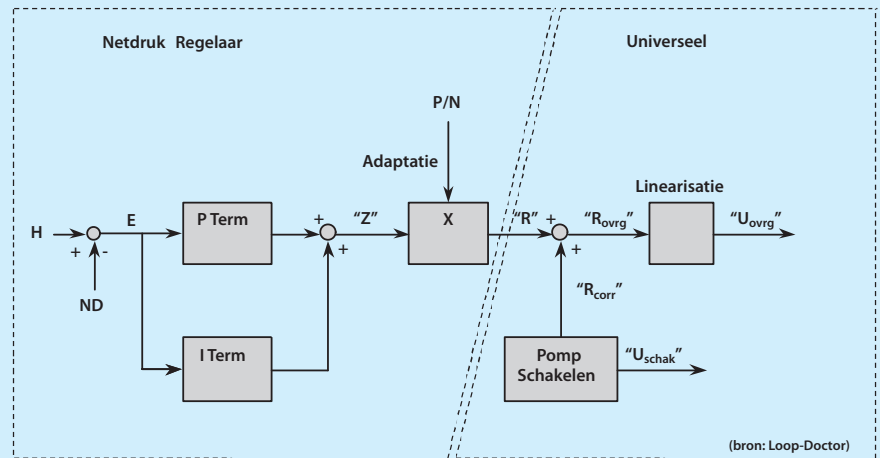
Samenvattend komt de oplossing er op neer dat de in te schakelen pomp versneld wordt opgetoerd tot een met een tweedegraads vergelijking berekend toerental waarbij de pomp nog net geen water levert. Vervolgens worden de andere pompen met een tweedegraads functie afgetoerd in verhouding tot het momentane toerental van de optoerende pomp. Of samengevat: met toepassing van eenvoudige wiskunde is het drukeffect van een optoerende pomp te elimineren.

Anticiperende debietregeling

Om pompstations in een vaste verhouding of sowieso stabiel binnen een voorzieningsgebied te laten distribueren, wordt gebruik gemaakt van een cascade-regeling. Eén pompstation regelt de druk in het distributienet. De andere pompstations regelen op een debiet dat in een vaste verhouding staat met de totale vraag in het voorzieningsgebied. Geleverd wordt een percentage van de totale vraag van het voorgaande kwartier. Om dit te bereiken is een debietregeling noodzakelijk die zich niet laat verstoren door het regelgedrag van het op druk geregelde pompstation. Debietregelingen in deze combinatie zijn moeilijk, onder alle omstandigheden (zie kader), stabiel te krijgen, zeker in het geval van PWN.

Het volgende concept voorziet in een gegarandeerd stabiele debietregeling. Als het debietgeregelde pompstation niet reageert op drukveranderingen van het op druk geregelde pompstation, is wederzijdse interactie tussen de pompstations volledig uitgesloten. Het negeren van drukveranderingen kan uitsluitend als door het debiet geregelde pompstation niet (direct) gereageerd wordt op druk-, debiet- of andere metingen. Voorwaarde is echter wel dat het pompstation het juiste aantal pompen op het juiste toerental aanstuurt, zodat een juist debiet resulteert. Dit kan als de pompen

Onderstaand is het principe van de aangepaste regeling schematisch weergegeven: lineariteit met behulp van de wortelfunctie, adaptatie op basis van net- en persdruk en het ingrijpen van het pompoverschakelen.



Afb. 3.

met H = netdruk wenswaarde, ND = gemeten netdruk (ongefilterd), P/N = gefilterde verhouding persdruk/netdruk, Z = de uitgang van de regeling voor adaptatie, R = de uitgang van de regeling na adaptatie, R_{corr} = de correctie van de uitsturing van de regeling voor het overschakelen van pompen, U_{schak} = de aansturing van de in/uit te schakelen pomp, R_{ovrg} = de gecorrigeerde uitgang van de andere pompen voor linearisatie, U_{ovrg} = de uitgang voor aansturing van de andere pompen.

op het debietgeregelde pompstation aangestuurd worden op basis van een berekend toerental (dus zonder directe reactie op de momentane druk of debiet). Er wordt wel bijgeregeld op debiet, weliswaar in tweede instantie. Maar om te stellen dat niet gekeken wordt naar het gemeten debiet gaat te ver. Betrekken van de debietmeting in de regeling was voorwaarde om tot een juiste verdeling van de vraag over de pompstations te komen. Het eerst sturen op basis van een berekend toerental en nadien regelen op het gemeten debiet maakt het geheel snel genoeg bij een toch rustige

en stabiele regeling. De directe interactie tussen pompstations is doorbroken en een sturing kan zeer snel, zonder veel regeltechnische consequenties, plaatsvinden. Wat het drukgeregelde pompstation ook doet, het debietgestuurde pompstation zal hier niet direct op reageren.

Probleem is dat wel het juiste toerental berekend moet worden om bij benadering het juiste debiet te verkrijgen. Deze berekening kan nauwkeurig uitgevoerd worden doordat de gewenste netdruk, de hydraulische verliezen en de pompkarakteristieken met wederom tweedegraads vergelijkingen goed te benaderen zijn. De beperkte fout die deze sturing nog kent, wordt met een zeer rustige debietregelaar gecorrigeerd. Weliswaar is toch weer sprake van een regelaar op basis van metingen, maar deze is in verhouding tot het drukgeregelde pompstation dusdanig rustig en stabiel dat ongewenste interacties zijn uitgesloten. Door combinatie van veel sturing en weinig regeling kan stabiel én snel in verhouding geregeld worden.

Conclusie

Het is gelukt om met een beperkt aantal wiskundige vergelijkingen het complexe distributieproces op robuuste wijze nauwkeurig en volautomatisch te regelen. Om dit te bereiken is kennis van het specifieke distributieproces van PWN, hydraulische kennis, kennis van pompen en regeltechniek gecombineerd. Kortom: een multidisciplinaire aanpak.

NOTEN

1. Plenty is de gestandaardiseerde procesautomatisering van PWN. Plenty Control is het onderdeel hiervan dat de productie prognosticeert en bestuurt.

Het effect van de regelaar op de mate waarin het debiet varieert, varieert door de variatie in steilheid van de pompcurve. Deze variatie maakt het moeilijk om onder alle condities de regelparameters stabiel en voldoende snel (met voldoende respons) in te stellen. Een debietsturing houdt rekening met de pompcurve en kent deze nadelen niet (gain = de versterkingsfactor).

Afb. 4.

