Optimering av kraftsystem under osäkerhet

Projektgrupp

- Optimization Partner Stockholm AB: Dr. Stefan Feltenmark (optimering) & Civ.Ing. Johan Wilhelmsson (mjukvaruutveckling),
- Lunds universitet, matematisk statistik: Tekn.lic. Roger Halldin & Prof. Jan Holst, (stokastik)
- Fraunhofer–Chalmers Center för Industrimatematik (FCC), Göteborg: Dr. Ann-Brith Strömberg, (optimering)

Uppdragsgivare

- Finansierat av STEM (Energimyndigheten), STM (Stiftelsen för tillämpad matematik), Elforsk (Svenska elföretagens FoU-AB), Sydkraft, Fortum, FCC, LU
- Kontrollgrupp med representanter från Sydkraft, Fortum, Elforsk och IEA (Industriell elektroteknik och automation, LTH)
- Användargrupper vid de deltagande företagen—dialog med projektgruppen, test & evaluering av utvecklad programvara

Kraftproduktion i Sverige

- Blandning av vatten-, värme- (gas, olja, kol, kärnbränsle) & vindkraft
- Avreglerad kraftmarknad:
  - Svenska kraftnät äger & handhar elkraftnätet
  - Producenter, säljare & konsumenter ansluter till nätet mot avgift
  - NordPool: Nordisk kraftbörs med fysisk och finansiell handel

Optimering av kraftproduktion

- Planeringshorisonter: *säsong*, medellång och kort
- *Maximera nyttan* av vinsten med hänsyn tagen till risk
- Begränsa *förväntade förluster* och/eller uppnå *vinstmål* vid flera olika tidpunkter
- Eliminera *prisrisk* m.h.a. en *portfölj av kontrakt* för leverans/köp av elkraft (forwards, futures, optioner) vid flera olika tidpunkter
- Vattenkraft är billig i drift men begränsad
- Värmekraft är "dyr" i drift men nästan obegränsad

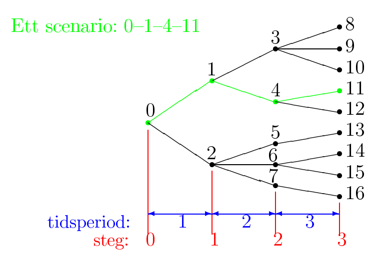
Matematisk modell för säsongsplanering

- Tidshorisont: 6–18 månader (beroende på vattenåret)
- Tidssteg: 1 vecka (längre steg nära horisonten)
- Planering för stora vattenmagasin högst upp i älvsystemen—lagring från år till år
- Betydande osäkerheter i inflöden och priser
- Ger indata till korttidsplanering: daglig reglering m.h.a. små magasin strax ovanför kraftstationer
- Ger indata till riskanalys

Mål

- Maximera den *förväntade* (diskonterade) nyttan
  Osäkerhet ⇒ stokastisk modell
- Vissa viktiga faktorer, som inflöden, spotpriser, efterfrågan av energi, är osäkra
- Antag att dessa faktorer är stokastiska variabler med kända eller uppskattade sannolikhetsfördelningar; approximera med diskreta fördelningar; representera med ett scenarioträd
- En optimal lösning till det approximerade problemet är när-optimal till det verkliga problemet

Ett scenarioträd med fyra tidssteg



Matematisk modell—bivillkor

- $\mathcal{N}$ = index för noder i scenarioträdet, $n \in \mathcal{N}$
- $\mathcal{H}$ = index för vattenkraftstationer/magasin, $h \in \mathcal{H}$
- v_{hn} = vatteninnehåll i magasin h "efter period" n
- v_{hn}^{of} = översvämmad volym, magasin h efter period n
- x_{hn}^{rel} = vattenutsläpp i station h under period n
- x_{hn}^{sp} = spillvatten vid station h under period n
- δ_{hn} = inflöde till magasin h under period n
- $\mathcal{J}_h$ = index för stationer direkt uppströms station h
- a_n = föräldern till nod n i scenarioträdet (unik)

- Vattenbalans (lagerbalans):

$$v_{hn} + v_{hn}^{\text{of}} = v_{ha_n} - x_{hn}^{\text{rel}} - x_{hn}^{\text{sp}} + \sum_{j \in \mathcal{J}_h} \left(x_{jn}^{\text{rel}} + x_{jn}^{\text{sp}} \right) + \delta_{hn}$$

- p_{hn}^{hyd} = mängd energi genererad vid vattenkraftstation h under period n
- p_{in}^{th} = mängd energi genererad vid värmekraftverk i under period n
- y_n = differens mellan mängd energi såld och köpt till marknadspris under period n
- L_n = efterfrågan av energi under period n
- $\mathcal{I}$ = index för värmekraftverk

- Energibalans: $\sum_{h \in \mathcal{H}} p_{hn}^{\text{hyd}} + \sum_{i \in \mathcal{I}} p_{in}^{\text{th}} - y_n = L_n$
- z_n = finansiell tillgång efter period n (ev. < 0)
- c_n = genomsnittligt (köp- & sälj-)pris för fysisk kraft i period n
- f_{nk} = kontraktsvolym vid tid n, leverans i period $k \geq n$
- c_{nk}^{con} = pris i period n för kontrakt att leverera 1MW i period $k \geq n$
- Finansiell balans:
  $z_n = z_{a_n} + c_n y_n + \sum_{k \geq n} \left(c_{nk}^{\text{con}} - c_{a_n k}^{\text{con}} \right) f_{nk}$
- $g_h^{\text{hyd}}(\cdot)$ energiomvandlingsfunktion för kraftstation h

- Verkningsgrad: $p_{hn}^{\text{hyd}} \leq g_h^{\text{hyd}}(v_{ha_n}, v_{hn}, x_{hn}^{\text{rel}}, x_{hn}^{\text{sp}})$
- Damminnehåll: $\underline{v}_{hn} \leq v_{hn} \leq \overline{v}_{hn}$
- Översvämning: $v_{hn}^{\text{of}} \geq 0$
- Dammutsläpp: $\underline{x}_{hn}^{\text{rel}} \leq x_{hn}^{\text{rel}} \leq \overline{x}_{hn}^{\text{rel}}$
- Spill: $\underline{x}_{hn}^{\text{sp}} \leq x_{hn}^{\text{sp}} \leq \overline{x}_{hn}^{\text{sp}}$
- Värmekraftproduktion: $\underline{p}_{in}^{\text{th}} \leq p_{in}^{\text{th}} \leq \overline{p}_{in}^{\text{th}}$
- Vattenkraftproduktion: $p_{hn}^{\text{hyd}} \geq 0$
- Kontraktsvolym: $f_{nk} \geq 0$

Matematisk modell—mål: nytta m.m.

- $c_n^{\text{b}}(\cdot)$ = nyttan av finansiell tillgång efter period n
- c_{in}^{th} = bränslekostnad/enhet, värmekraftverk i, period n
- $g_i^{\text{th}}(\cdot)$ = förbrukning av bränsle i värmekraftverk i
- K_h = straff vid översvämning i magasin h
- $G_n(\cdot)$ = värdet av lagrat vatten i period n (endast sista tidssteget)
- π_n = sannolikheten att nod n i scenarioträdet inträffar
- ρ_n = diskonteringsfaktor från period n till period 1

Målfunktion: Maximera förväntad (diskonterad) nytta minus förväntade bränslekostnader och översvämningsstraff

- $\mathcal{N}_T$ = löven i scenarioträdet
- Maximera

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} \pi_n \rho_n \left(c_n^{\text{b}}(z_n) - c_{a_n}^{\text{b}}(z_{a_n}) - \sum_{i \in \mathcal{I}} c_{in}^{\text{th}} g_i^{\text{th}}(p_{in}^{\text{th}}) - \sum_{h \in \mathcal{H}} K_h v_{hn}^{\text{of}} \right) + \sum_{n \in \mathcal{N}_T} \pi_n \rho_n G_n(v_{1n}, \ldots, v_{Hn})$$

Stokastisk optimeringsmodell

maximera

$$\sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{n \in \mathcal{N}_t} \pi_n \rho_n \left(c_n^{\text{b}}(z_n) - c_{a_n}^{\text{b}}(z_{a_n}) - \sum_{i \in \mathcal{I}} c_{in}^{\text{th}} g_i^{\text{th}}(p_{in}^{\text{th}}) - \sum_{h \in \mathcal{H}} K_h v_{hn}^{\text{of}} \right) + \sum_{n \in \mathcal{N}_T} \pi_n \rho_n G_T(v_{1n}, \ldots, v_{Hn})$$

då

$$v_{hn} + v_{hn}^{\text{of}} = v_{ha_n} - x_{hn}^{\text{rel}} - x_{hn}^{\text{sp}} + \sum_{j \in \mathcal{J}_h} \left(x_{jn}^{\text{rel}} + x_{jn}^{\text{sp}} \right) + \delta_{hn} \qquad h \in \mathcal{H},\ n \in \mathcal{N}_t,\ t \in \mathcal{T}$$

$$\begin{aligned}
&z_n = z_{a_n} + c_n y_n + \sum_{k \geq n} \left(c_{nk}^{\text{con}} - c_{a_n k}^{\text{con}} \right) f_{nk}, && n \in \mathcal{N}_t, t \in \mathcal{T} \\
&\sum_{h \in \mathcal{H}} p_{hn}^{\text{hyd}} + \sum_{i \in \mathcal{I}} p_{in}^{\text{th}} - y_n = L_n, && n \in \mathcal{N}_t,\ t \in \mathcal{T} \\
&p_{hn}^{\text{hyd}} \leq g_h^{\text{hyd}}(v_{ha_n}, v_{hn}, x_{hn}^{\text{rel}}, x_{hn}^{\text{sp}}) && h \in \mathcal{H},\ n \in \mathcal{N}_t,\ t \in \mathcal{T}_0 \setminus \{T\} \\
&\underline{v}_{hn} \leq v_{hn} \leq \overline{v}_{hn}, && h \in \mathcal{H},\ n \in \mathcal{N}_t,\ t \in \mathcal{T} \\
&v_{hn}^{\text{of}} \geq 0, && h \in \mathcal{H},\ n \in \mathcal{N}_t,\ t \in \mathcal{T} \\
&\underline{x}_{hn}^{\text{rel}} \leq x_{hn}^{\text{rel}} \leq \overline{x}_{hn}^{\text{rel}}, && h \in \mathcal{H},\ n \in \mathcal{N}_t,\ t \in \mathcal{T}_0 \setminus \{T\} \\
&\underline{x}_{hn}^{\text{sp}} \leq x_{hn}^{\text{sp}} \leq \overline{x}_{hn}^{\text{sp}}, && h \in \mathcal{H},\ n \in \mathcal{N}_t,\ t \in \mathcal{T} \\
&\underline{p}_{in}^{\text{th}} \leq p_{in}^{\text{th}} \leq \overline{p}_{in}^{\text{th}}, && i \in \mathcal{I},\ n \in \mathcal{N}_t,\ t \in \mathcal{T}_0 \setminus \{T\} \\
&p_{hn}^{\text{hyd}} \geq 0, && h \in \mathcal{H},\ n \in \mathcal{N}_t,\ t \in \mathcal{T}_0 \setminus \{T\} \\
&f_{nk} \geq 0, && k \geq n, n \in \mathcal{N}_t,\ t \in \mathcal{T}_0
\end{aligned}$$

Den stokastiska modellen

- Ger beslutsunderlag för varje tidssteg och scenario
- Endast besluten för den "närmaste framtiden" används:
  - tag hänsyn till alla framtida utfall i scenarioträdet och dess sannolikheter
- I nästa vecka (tidssteg) kommer denna veckas utfall att vara känt och vi löser en "ny" modell
- Stort scenarioträd ⇒ storskaligt optimeringsproblem
  - Beräkningstid och/eller lagringsutrymme ökar "okontrollerat"

Storskalig optimering

- Ett "mindre" problem för varje scenario, kopplat via scenarier i tidigare tidssteg
- Lösningsansats: nästlad Benders-dekomposition
  - Låt steg $2, \dots, T$ vara steg 2 i Benders-algoritmen
  - Lös subproblemen (noder i steg 2) med Benders-dekomposition
    - Låt steg $3, \dots, T$ vara steg 2 i Benders-algoritmen
    - Lös subproblemen (noder i steg 3) med Benders-dekomposition
      - Låt steg $4, \dots, T$ vara ......

Generering och reduktion av scenarioträd för vattenflöden

- *Stark korrelation* mellan inflöden till närliggande vattenmagasin
- Använder faktor- and principalkomponentanalys för att *minska trädets storlek*
- Stokastikmodeller är utvecklade för:
  - nivåberoende varians och
  - separering av tiden för vårfloden från dess storlek

Seasonal Planning Optimization Tool SPOT—prototyp från föregående projekt

- Stokastisk optimeringsmodell för säsongsplanering, koordinerar fysisk produktion och kontraktsportfölj
- Nyttofunktioner avspeglar risker: approximerade med styckvis linjära funktioner ⇒ rent linjär modell
- Straff (böter) i händelse av översvämning
- Olika varianter av nästlad Bendersdekomposition implementerade i Matlab med Cplex-lösare
- *Reduktion* av scenarioträd m.h.a. principalkomponenter

Fortsatt utveckling

- Förbättra och utveckla prototypen: modellen inkl. scenarioträd, algoritmen, implementering
- Konstruktion av mer effektiva lösningsmetoder
- Den höga problemkomplexiteten erfordrar:
  - approximation i vissa delar av modellen
  - *nästan optimerande* metoder på flera nivåer
  - analys av approximationsfel
  - vidare reduktion av scenarioträd

- Dynamisk representation av scenarioträdet
  - växt/krymp beroende på noggrannhets/vikt-mått
  - glest/tätt i olika grenar
- Utvidgning till exv. vindkraft (ny, svår stokastik att utreda)
- Implementering av metoder för operationell testning
- Doktorsavhandling (Lund)