



KTH Elektro-
och systemteknik

Kompletteringskrivning i EG2050 Systemplanering, 23 april 2014, 10:00-12:00, seminarierummet

Instruktioner

Endast de uppgifter som är markerade på det bifogade svarsbladet behöver lösas (på de övriga uppgifterna tillgodoräknas resultatet från tentamen). Några motiveringar eller beräkningar behöver inte redovisas.

Denna kompletteringskrivning kan totalt ge 40 poäng. Godkänt betyg garanteras vid 33 poäng.

Tillåtna hjälpmedel

Vid denna kompletteringskrivning får följande hjälpmedel användas:

- Miniräknare utan information med anknytning till kursen.
- En **handskriven, enkelsidig** A4-sida med **egna** anteckningar (original, ej kopia).
Denna sida skall lämnas in tillsammans med svarsbladet.

Uppgift 1 (4 p)

Besvara följande teorifrågor genom att välja *ett* alternativ, som du anser är korrekt.

a) (1 p) Vilken eller vilka aktörer har det ekonomiska ansvaret för att systemet under en viss handelsperiod (t.ex. en timme) tillförs lika mycket energi som förbrukats?

1. Systemoperatören.
2. De balansansvariga.
3. Konsumenterna.

b) (2 p) Med förhandshandeln avser vi all handel som sker före själva leveranstimmen (eller någon annan handelsperiod). På förhandsmarknaden kan man handla med följande typer av kontrakt: I) Självbetjäningkontrakt, d.v.s. då kunden abonnerar på en viss maximal effekt och under kontraktets giltighetstid får köpa valfri mängd energi per handelsperiod, så länge den maximala effekten inte överskrids, II) Fastkraft, d.v.s. då en säljaren förbinder sig att leverera en viss mängd energi i varje handelsperiod under kontraktets giltighetstid, III) Reglerkraft, d.v.s. då en aktör på begäran av systemoperatören tillför systemet mer effekt (uppreglering) eller då en aktör på begäran av systemoperatören tar ut mer effekt från systemet (nedreglering).

1. Inget av påståendena är sanna.
2. Endast I är sant.
3. Endast II är sant.
4. Endast III är sant.
5. I och II är sanna men inte III.

c) (1 p) Med efterhandshandeln avser vi all handel som sker efter själva leveranstimmen (eller någon annan handelsperiod). Vilket av följande typer av kontrakt kan handlas på en efterhandsmarknad?

1. Balanskraft, d.v.s. då en balansansvarig aktör säljer ett eventuellt överskott i sin balans till systemoperatören, eller då en balansansvarig aktör köper av systemoperatören för att täcka ett eventuellt underskott i sin balans.
2. Fastkraft, d.v.s. då en säljaren förbinder sig att leverera en viss mängd energi i varje handelsperiod under kontraktets giltighetstid.
3. Reglerkraft, d.v.s. då en aktör på begäran av systemoperatören tillför systemet mer effekt (uppreglering) eller då en aktör på begäran av systemoperatören tar ut mer effekt från systemet (nedreglering).

Uppgift 2 (6 p)

Antag att det råder perfekt konkurrens på elmarknaden i Land, att alla aktörer har perfekt information och att det inte finns nät-, magasins- eller effektbegränsningar. Data för kraftverken i Land ges i tabell 1. De rörliga produktionskostnaderna antas vara linjära i de angivna intervallen; då produktionen är noll är priset på den lägsta nivån och vid maximal produktion är priset maximalt.

Tabell 1 Data för kraftverken i Land.

Kraftslag	Produktionskapacitet [TWh/år]	Rörlig kostnad [\varnothing /MWh]
Vattenkraft	66	5
Kärnkraft	60	90–100
Biobränsle	20	200–400
Fossila bränslen	10	300–500

- a) (2 p)** Förutom den inhemska produktionen importerar Land även 6 TWh från Maa. Hur stor är elförbrukningen i Land om elpriset under ett visst år är 360 \varnothing /MWh?
- b) (1 p)** Betrakta samma system som i a-uppgiften, men antag att kärnkraftproducenterna måste betala en avfallshanteringsavgift på 10 \varnothing för varje producerad MWh. Vilket elpris får man då i Land?
- c) (1 p)** Betrakta samma system som i a-uppgiften, men antag att det dessutom finns 6 TWh vindkraft med försumbar rörlig kostnad. Vilket elpris får man då i Land?
- d) (2 p)** Om man tar hänsyn till kapacitetsbegränsningar i kraftverken och transmissionsbegränsningar så varierar elpriset i Land och Maa från timme till timme. Betrakta en timme då elpriset i Land är 400 \varnothing /MWh och elpriset i Maa är 300 \varnothing /MWh. Antag att ledningarna mellan de två länderna har en kapacitet på 800 MW. Hur mycket importerar Land från Mark under denna timme?

Uppgift 3 (6 p)

Betrakta ett elsystem indelat i fyra areor. Data för primärregleringen i systemet framgår av tabell 2. Data för transmissionsförbindelserna mellan areorna framgår av tabell 3. Varje förbindelse är försedd med ett skyddssystem som efter en kort tidsfördröjning automatiskt kopplar bort förbindelsen om flödet skulle överskrida den maximala kapaciteten. Effektflödena på HVDC-förbindelsen påverkas inte av frekvensen i systemet, utan kan bara kontrolleras manuellt.

Tabell 2 Data för primärregleringen.

Area	Reglerstyrka (tillgänglig mellan 49,0 och 51,0 Hz) [MW/Hz]
A	2 500
B	3 000
C	1 500
D	1 000

Tabell 3 Data för transmissionsförbindelserna.

Förbindelse	Typ	Nuvarande transmission (kl. 10:15) [MW]	Maximal kapacitet [MW]
A ↔ B	Växelström	1 600 MW från A till B	2 000
A ↔ C	Växelström	600 MW från A till C	1 000
B ↔ D	Växelström	1 000 MW från B till D	1 500
C ↔ D	Likström (HVDC)	500 MW från C till D	600

a) (1 p) Klockan 10:00 råder balans mellan produktion och konsumtion i systemet, inga transmissionsförbindelser är överbelastade och frekvensen i area A är lika med 50,3 Hz. Vilken frekvens har man i area D vid detta tillfälle?

b) (2 p) Vid det tillfälle som beskrivs i a-uppgiften förlorar man 800 MW produktion i area B och strax därefter kopplas ytterligare 400 MW produktion bort i area D. Hur stor blir överföringen från area A till area B efter att primärregleringen stabiliserat frekvensen i systemet efter dessa två händelser? (Svara 0 MW om förbindelsen kopplas bort p.g.a. överbelastning.)

c) (1 p) Vilken frekvens får man i area A då primärregleringen stabiliserat frekvensen i systemet efter händelserna i b-uppgiften?

d) (2 p) Vilken frekvens får man i area B då primärregleringen stabiliserat frekvensen i systemet efter händelserna i b-uppgiften?

Uppgift 4 (12 p)

Stads energi AB äger ett termiskt kraftverk med tre block. Antag att bolaget formulerat sitt korttidsplaneringsproblem som ett MILP-problem och att man har infört följande beteckningar:

Index för kraftverken: Block I - 1, Block II - 2, Block III - 3.

β_{Gg} = rörlig produktionskostnad i kraftverk g , $g = 1, 2, 3$,

C_g^* = startkostnad om kraftverk g startas efter en timmes driftstopp, $g = 1, 2, 3$,

C_g^{**} = startkostnad om kraftverk g startas efter minst två timmars driftstopp,
 $g = 1, 2, 3$,

$G_{g,t}$ = elproduktion i kraftverk g , timme t , $g = 1, 2, 3$, $t = 1, \dots, 24$,

\bar{G}_g = installerad effekt i kraftverk g , $g = 1, 2, 3$,

\underline{G}_g = minimal elproduktion då kraftverk g är i drift, $g = 1, 2, 3$,

λ_t = förväntat elpris timme t , $t = 1, \dots, 24$,

$s_{g,t}^*$ = start av kraftverk g under timme t efter en timmes driftstopp, $g = 1, 2, 3$,
 $t = 1, \dots, 24$,

$s_{g,t}^{**}$ = start av kraftverk g under timme t efter två eller flera timmars driftstopp,
 $g = 1, 2, 3$, $t = 1, \dots, 24$,

$u_{g,0}$ = driftstatus i kraftverk g vid planeringsperiodens början, $g = 1, 2, 3$,

$u_{g,t}$ = driftstatus i kraftverk g , timme t , $g = 1, 2, 3$, $t = 1, \dots, 24$.

a) (4 p) Stads energi AB säljer el på den lokala börsen ElKräng. Formulera målfunktionen i bolagets planeringsproblem om syftet med planeringen är att maximera intäkterna från såld el minus kostnaderna i det termiska kraftverket. Använd beteckningarna ovan.

b) (4 p) Formulera det bivillkor som reglerar sambandet mellan maximal elproduktion och driftstatus i kraftverk g , timme t . Använd beteckningarna ovan.

c) (3 p) Formulera gränserna för de optimeringsvariabler i Stads energi AB:s korttidsplaneringsproblem som definierats ovan. För att få full poäng på denna uppgift måste du även ange tillåtna indexvärden för varje gräns!

d) (1 p) Den bästa produktionsekvivalenten i vattenkraftverket Strömmen är 0,75 MWh/TE och uppnås vid tappningen 160 TE. Vid tappningen 200 TE är den relativa verkningsgraden 96%. Hur mycket producerar Forsen vid tappningen 200 TE?

Uppgift 5 (12 p)

Betrakta en elmarknad med normalfördelad last som försörjs av tre kraftverk på 300, 200 respektive 100 MW (sorterade efter stigande rörlig produktionskostnad). I tabell 4 visas några delresultat då man genomför en stokastisk produktionskostnadssimulering av denna elmarknad.

Tabell 4 Resultat från en stokastisk produktionskostnadssimulering av elmarknaden i uppgift 5.

	$x = 250$	$x = 300$	$x = 350$	$x = 400$	$x = 450$	$x = 500$	$x = 550$	$x = 600$	$x = \infty$
$F_0(x)$	0,841	0,159	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
$\int_0^x \tilde{F}_0(\xi) d\xi$	247,917	272,917	274,990	275,000	275,000	275,000	275,000	275,000	275,000
$F_1(x)$	0,849	0,201	0,051	0,050	0,050	0,050	0,042	0,008	0,000
$\int_0^x \tilde{F}_1(\xi) d\xi$	248,021	274,271	278,741	281,250	283,750	286,250	288,646	289,896	290,000
$F_2(x)$	0,864	0,281	0,146	0,145	0,130	0,065	0,043	0,012	0,000
$\int_0^x \tilde{F}_2(\xi) d\xi$	248,219	276,844	285,867	293,124	300,177	305,052	307,655	309,031	310,000
$F_3(x)$	0,878	0,352	0,218	0,158	0,132	0,073	0,052	0,017	0,000
$\int_0^x \tilde{F}_3(\xi) d\xi$	248,397	279,159	292,102	301,496	308,746	313,859	316,908	318,633	320,000

- a) (1 p) Hur stor är sannolikheten att lasten i systemet är större än 300 MW?
- b) (3 p) Vilken *LOLP* har man i systemet?
- c) (2 p) Hur stor är den förväntade elproduktionen per timme i det tredje kraftverket?
- d) (2 p) Antag att samma system simuleras med Monte Carlo-teknik och att man slumpat fram värdet 250 MW för den totala lasten. Vad är slumpalskomplementet till detta slumpstal?
- e) (4 p) Antag att man simulerar samma elmarknad med hjälp av en multiareamodell. Resultaten från 10 000 scenarier redovisas i tabell 5. I denna simulering används både kontrollvariabler och stratifierad sampling. Vilken skattning av *LOLP* ger denna simulering?

Tabell 5 Resultat från en Monte Carlo-simulering av elsystemet i uppgift 5.

Stratum, h	Stratumvikt, ω_h	Antal scenarier, n_h	Resultat från multi-areamodell, $\sum_{i=1}^h x_{i,h}$ (där $x_{i,h}$ är det observerade värdet på <i>LOLO</i> i scenario i , stratum h)	Resultat från SPS-modell, $\sum_{i=1}^h z_{i,h}$ (där $z_{i,h}$ är det observerade värdet på <i>LOLO</i> _{SPS} i scenario i , stratum h)
1	0,913	4 900	0	0
2	0,070	5 000	900	0
3	0,017	100	100	100



KTH Elektro-
och systemteknik

Svarsblad

Namn:

Personnummer:

Uppgift 1

a) Alternativ är korrekt.

b) Alternativ är korrekt.

c) Alternativ är korrekt.

Uppgift 2

a) TWh b) \varnothing /MWh

c) \varnothing /MWh d) MWh

Uppgift 3

a) Hz b) MW

c) Hz d) Hz

Uppgift 4

a)

b)

c)

.....

.....

d) MW

Uppgift 5

a) % b) %

c) MWh/h d) MW

e) %

Uppgift 1

- a) 2, b) 5, c) 1.

Uppgift 2

- a) Vid elpriset 360 ¢/MWh producerar vattenkraften och kärnkraften för fullt, d.v.s. 66 + 60 = 126 TWh. Bidraget från biobränslekraftverken är lika med (360 - 200)/(400 - 200) = 20 = 16 TWh och fossilkraften levererar (360 - 300)/(500 - 300) = 10 = 3 TWh. Sammantaget produceras således 145 TWh/år. Dessutom importeras 6 TWh vilket ger en total elförbrukning på 151 TWh/år.
- b) Den rörliga produktionskostnaden i kärnkraften inklusive avgiften hamnar mellan 100 och 110 ¢/MWh. Eftersom detta fortfarande är lägre än det tidigare elpriset i Land kommer kärnkraftverken att fortsätta att producera för fullt och samma kraftverk som tidigare (d.v.s. biobränsle och fossilkraft) kommer att sätta priset. Med andra ord kommer elpriset att förbli 360 ¢/MWh.
- c) I det här fallet ska biobränsle plus fossila bränslen tillsammans producera 13 TWh. Bidraget från biobränsle plus fossila bränslen kan skrivas

$$\frac{\lambda - 200}{400 - 200} \cdot 20 + \frac{\lambda - 300}{500 - 300} \cdot 10.$$

Sätter man detta uttryck lika med 13 och löser ekvationen får man elpriset $\lambda = 320$ ¢/MWh.

- d) Eftersom elpriset i Maa är lägre än i elpriset i Land kommer Land att importera så mycket som möjligt, d.v.s. 800 MWh.

Uppgift 3

- a) Alla arcor är förbundna via växelströmsledningar och ugöer således ett synkront nät. Frekvensen i D är därför densamma som i area A, d.v.s. 50,3 Hz.
- b) Halften av systemets reglerstyrka finns i area A och C. Primärregleringen i dessa två arcor kommer således att öka elproduktionen med 600 MW (halva bortfallet). Eftersom flödet mellan area C och D endast styrs manuellt måste hela den ökade elproduktionen överföras på ledningen mellan area A och area B. Denna har emellertid inte tillräckligt med ledig kapacitet och kommer därför att kopplas bort. Överföringen blir med andra ord 0 MW.
- c) Efter att ledningen mellan A och B kopplats bort utgör area A och C ett eget synkront nät med en total reglerstyrka på 4 000 MW/Hz. I detta synkrona nät finns nu ett överskott på 1 600 MW (den effekt som tidigare skickades till area B), vilket leder till en frekvensökning $\Delta f = \Delta G/R = 1 600/4 000 = 0,4$ Hz, d.v.s. den nya frekvensen blir 50,3 + 0,4 = 50,7 Hz.
- d) Efter att ledningen mellan A och B kopplats bort utgör area B och D ett eget synkront nät med en total reglerstyrka på 4 000 MW/Hz. I detta synkrona nät finns nu ett underskott på 1 200 MW (bortfallet i kraftverken) + 1 600 MW (den effekt som tidigare importerades från area A), vilket leder till en frekvensminskning $\Delta f = \Delta G/R = 2 800/4 000 = 0,7$ Hz, d.v.s. den nya frekvensen blir 50,3 - 0,7 = 49,6 Hz.

Uppgift 4

24 3

- a) maximera $\sum_{t=lg=1}^3 (\lambda_t - \beta_{Gg}) G_{g,t} - C_{g,t}^{**} S_{g,t}^{**} - C_{g,t}^{**} S_{g,t}^{**}$.

- b) $C_{g,t} \leq u_{g,t} \bar{C}_{g,t}$.

- c) Minsta respektive största elproduktion i varje timme regleras med särskilda bivillkor. De enda gränser som behöver anges är därmed för de binära variablerna:

$$s_{g,t}^{**} \in \{0, 1\}, \quad g = 1, 2, 3, t = 1, \dots, 24,$$

$$s_{g,t}^{**} \in \{0, 1\}, \quad g = 1, 2, 3, t = 1, \dots, 24,$$

$$u_{g,t} \in \{0, 1\}, \quad g = 1, 2, 3, t = 1, \dots, 24.$$

- d) Elproduktionen ges av $H(Q) = \eta_{max} \cdot \eta(Q) \cdot Q = 0,75 \cdot 0,96 \cdot 200 = 144$ MW.

Uppgift 5

- a) Varaktighetskurvan för lasten i anger sannolikheten att lasten överskrider en viss nivå. I det här fallet söks alltså $\bar{F}_0(300) = \{\text{läs av i tabell}\} = 15,9\%$.

- b) $LOLP = \bar{F}_3(600) = 1,7\%$.

$$\begin{aligned} \text{c) } EG_3 &= EENS_2 - EENS_3 = \int_{500}^{\infty} \bar{F}_2(\xi) d\xi - \int_{600}^{\infty} \bar{F}_3(\xi) d\xi = \\ &= \left(\int_0^{\infty} \bar{F}_2(\xi) d\xi - \int_0^{\infty} \bar{F}_3(\xi) d\xi \right) - \left(\int_0^{\infty} \bar{F}_3(\xi) d\xi - \int_0^{\infty} \bar{F}_3(\xi) d\xi \right) = \\ &= (310,000 - 305,052) - (320,000 - 318,633) = 3,581 \text{ MWh/h.} \end{aligned}$$

- d) Med den inversa transformmetoden erhålls $D = F_D^{-1}(U)$, där U är ett $U(0, 1)$ -fördelat slumptal. Eftersom vi i uppgiften fått varaktighetskurvan i stället, kan vi lika gärna använda transformen $D = F_D^{-1}(U)$. Det ursprungliga slumptalet måste ha varit $U = F_D(200) = 0,841$. Således är $U^* = 1 - U = 0,159$, vilket ger $D^* = F_D^{-1}(U^*) = 300$ MW.

Uppgiften kan också lösas genom att konstatera att normalfördelningen är symmetrisk, vilket betyder att om $D = \mu + X$ så är $D^* = \mu - X$. I det här fallet är $\mu = E[D] = 275$; med andra ord så är $D = 275 + (-25)$ och då får vi $D^* = 275 - (-25) = 300$ MW.

- e) Först beräknar vi den förväntade skillnaden mellan multi-areamodellen och SPS-modellen i respektive stratum:

$$m(x-z)_h = \frac{1}{n_h} \sum_{i=1}^{n_h} (x_{i,h} - z_{i,h}) = \frac{1}{n_h} \left(\sum_{i=1}^{n_h} x_{i,h} - \sum_{i=1}^{n_h} z_{i,h} \right)$$

$$\Rightarrow m(x-z)_{1,1} = 0,$$

$$m(x-z)_{2,2} = (900 - 0)/5 000 = 0,18,$$

$$m(x-z)_{3,3} = 0.$$

Därefter viktar vi ihop resultaten för varje stratum i enlighet med deras stratumvikter:

$$m_{(X-Z)} = \sum_{h=1}^3 \omega_h m_{(X-Z),h} = 0 + 0,07 \cdot 0,18 + 0 = 0,0126.$$

LOLP för multi-areamodellen ges av den förväntade skillnaden plus resultatet från SPS-modellen (som beräknades i b-uppgiften):

$$LOLP = m_{(X-Z)} + LOLP_{SPS} = 0,0126 + 0,017 = 2,96\%.$$