ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2002
Seria: AUTOMATYKA z. 134 Nr kol. 1554

Tomasz ŚLIWIŃSKI
Politechnika Warszawska

HARMONOGRAMOWANIE PRACY JEDNOSTEK WYTWÓRCZYCH ENERGII ELEKTRYCZNEJ Z UŻYCIEM TECHNIK GENERACJI KOLUMN

Streszczenie. Rozważane jest zagadnienie dobowego harmonogramowania pracy jednostek wytwórczych energii elektrycznej przy scentralizowanym modelu planowania kosztowego. Skupiono się na problemie doboru jednostek do pracy. Przedstawiono model klasyczny oraz jego przeformułowanie umożliwiające zastosowanie technik generacji kolumn. Zaprezentowano także heurystyczny algorytm naprawy harmonogramów niedopuszczalnych.

UNIT COMMITMENT IN POWER SYSTEMS BY COLUMN GENERATION

Summary. Centralized cost-based unit commitment problem is considered. The classical mathematical model is presented. Then the new formulation of the model is introduced, allowing the use of the column generation method. Finally it is shown how to remove infeasibilities from some of the schedules.

1. Wprowadzenie

Prawidłowe funkcjonowanie systemów elektroenergetycznych wymaga dokładnego planowania pracy poszczególnych jego elementów. Uwzględnione przy tym muszą być zarówno aspekty ekonomiczne, jak i techniczne generacji energii. Jednym ze sposobów planowania pracy systemu elektroenergetycznego jest *scentralizowane planowanie kosztowe*. W metodzie tej główną rolę odgrywa operator systemu, który znając charakterystyki i ograniczenia poszczególnych elementów systemu oraz prognozy zapotrzebowania na energię elektryczną, dokonuje rozdziału obciążeń na poszczególne jednostki wytwórcze w rozpatrywanym okresie czasu. Rozdział obciążeń powinien minimalizować całkowity koszt wytworzenia energii pokrywającej prognozowane zapotrzebowanie. Muszą przy tym zostać uwzględnione kwestie bezpieczeństwa i niezawodności systemu energetycznego.

Zadanie wyznaczenia rozdziału obciążeń jest na ogół procesem dwufazowym. W fazie pierwszej dokonuje się doboru jednostek do pracy (ang. *Unit Commitment*) w dłuższym horyzoncie czasu, np. jednej doby, w fazie drugiej natomiast wyznacza się bieżące wielkości generacji (punkty pracy) poszczególnych jednostek wytwórczych (ang. *Economic Dispatch*). Są przy tym uwzględniane tylko te jednostki, których pracę przewidziano w harmonogramie wyznaczonym w fazie pierwszej.

Jednostka wytwórcza może się znajdować zasadniczo w jednym z trzech stanów [1]: praca, odstawienie, rozruch. Stan pracy umożliwia jednostce generowanie energii w zakresie mocy minimalnej p^{min} do mocy maksymalnej p^{max}. Zejście poniżej mocy minimalnej nie jest możliwe bez całkowitego odstawienia jednostki. Jednostka będąca w stanie odstawienia przed przejściem do stanu pracy wymaga rozruchu. Proces rozruchu jest opisywany przez tzw. charakterystyki uruchomieniowe, wynikające z właściwości fizycznych jednostki.

Popyt w scentralizowanym modelu planowania kosztowego jest reprezentowany przez prognozę popytu D_h dla kolejnych etapów h okresu planowania. Ze względu na niepewność dostępnej prognozy uwzględnia się także ograniczenia związane z rezerwami mocy. Od wyznaczanego harmonogramu wymaga się, żeby w każdym etapie h możliwa była generacja sumarycznej mocy powyżej poziomu D_h^+, bez konieczności uruchamiania kolejnych jednostek. Czasami zakłada się także, aby możliwa była generacja sumarycznej mocy nie wyższej od D_h^-, bez konieczności odstawiania jednostek.

W dalszej części niniejszego opracowania skupiono się głównie na fazie pierwszej powyższego procesu, czyli na doborze jednostek do pracy. Wykorzystano jednak pewne elementy charakterystyczne dla fazy drugiej, takie jak charakterystyki kosztowe poszczególnych jednostek. W rozdziale drugim omówiono klasyczny model problemu doboru jednostek wytwórczych. W rozdziale trzecim przedstawiono alternatywne sformułowanie modelu. Rozdział czwarty poświęcono heurystycznym algorytmom naprawy planów pracy otrzymanych za pomocą techniki generacji kolumn.

2. Klasyczny model problemu doboru jednostek

Przyjmijmy następujące oznaczenia:

D_h zapotrzebowanie na moc w etapie h,

D_h^+ zapotrzebowanie na moc wraz z wymaganą rezerwą górną w etapie h,

D_h^- zapotrzebowanie na moc wraz z wymaganą rezerwą dolną w etapie h,

$p_j^{\min}, p_j^{\max}$ moce minimalna i maksymalna jednostki j będącej w stanie pracy,

T_j minimalny okres odstawienia jednostki j,

S_j stały składnik kosztu pojedynczego rozruchu jednostki j,

A_j^i, B_j^i współczynniki nachylenia oraz przesunięcia i-tej liniowej części krzywej kosztów jednostki j,

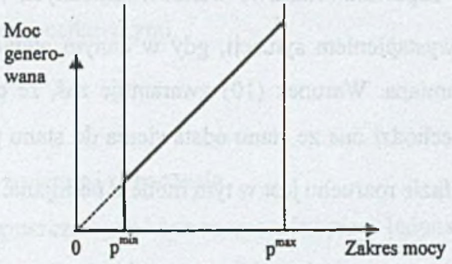
v_{jh} zmienna binarna równa 1, jeśli w etapie h jednostka j znajduje się w stanie pracy, 0 w przeciwnym razie},

r_{jh} zmienna binarna równa 1, jeśli w etapie h jednostka j przechodzi do stanu pracy, 0 w przeciwnym razie,

o_{jh} zmienna binarna równa 1, jeśli w etapie h jednostka j przechodzi do stanu odstawienia, 0 w przeciwnym razie,

p_{jh} zmienna wyrażająca moc generowaną przez jednostkę j w etapie h (równą zero, jeśli jednostka nie znajduje się w stanie pracy; patrz rys.1),

K_{jh} koszt generacji energii przez jednostkę j w etapie h.



Rys.1. Generowana moc

Fig.1. Power generated

Rozpatrzmy teraz następujący model.

Zminimalizować
$$\sum_{h\in H}\sum_{j\in J} K_{jh} + S_j r_{jh} \tag{1}$$

przy ograniczeniach
$$\sum_{j\in J} p_{jh} = D_h;\ \ \forall h \in H \tag{2}$$

$$\sum_{j\in J} v_{jh} p_j^{\max} \geq D_h^+;\ \ \forall h \in H \tag{3}$$

$$\sum_{j\in J} v_{jh} p_j^{\min} \leq D_h^-;\ \ \forall h \in H \tag{4}$$

$$K_{jh} \geq A_j^i p_{jh} + B_j^i v_{jh};\ \ \forall i \in I, j \in J, h \in H \tag{5}$$

$$p_j^{\min} v_{jh} \leq p_{jh} \leq p_j^{\max} v_{jh};\ \ \forall j \in J, h \in H \tag{6}$$

$$v_{jh}, r_{jh} \in \{0,1\};\ \ \forall j \in J, h \in H \tag{7}$$

W funkcji celu (1) minimalizowany jest sumaryczny koszt generacji dla wyznaczonego harmonogramu. Ograniczenia (2) zapewniają pokrycie zapotrzebowania w poszczególnych etapach okresu planowania. Warunki (3) oraz (4) gwarantują utrzymanie założonego poziomu rezerwy. Nierówności (5) umożliwiają modelowanie odcinkami liniowej funkcji kosztu. Właściwa relacja między zmiennymi p_{jh} i v_{jh} jest zapewniona dzięki ograniczeniom (6) i (7).

Ponadto w powyższym modelu należy uwzględnić ograniczenia techniczne wynikające z właściwości fizycznych poszczególnych jednostek. Przyjęto uproszczony model ograniczeń dla pojedynczej jednostki opisany przez następujące zależności.

$$v_{jh} - v_{j,h-1} = r_{jh} - o_{jh};\ \forall j \in J, h \in H \tag{8}$$

$$o_{jh} + r_{jh} \leq 1;\ \forall j \in J, h \in H \tag{9}$$

$$o_{jh} + r_{j,h+t} \leq 1;\quad \forall j \in J, h \in H, t = 1 \ldots T_j - 1 \tag{10}$$

Warunek (8) zapewnia właściwe wartości zmiennych r_{jh} oraz o_{jh}. Nierówność (9) zabezpiecza przed wystąpieniem sytuacji, gdy w danym etapie jednostka jest jednocześnie odstawiana i uruchamiana. Warunek (10) gwarantuje zaś, że czas rozruchu jednostki, czyli czas, po którym przechodzi ona ze stanu odstawienia do stanu pracy, jest nie krótszy niż T_j. Moc generowana w fazie rozruchu jest w tym modelu pomijana.

3. Model zdezagregowany

Klasyczny model doboru jednostek przedstawiony w poprzednim punkcie jest przykładem zadania programowania liniowego mieszanego. Rozwiązanie go metodą bezpośrednią, za pomocą odpowiedniego solwera nie wchodzi jednak w rachubę. Powodem jest duża liczba zmiennych całkowitoliczbowych występujących w zdaniu (5400 zmiennych binarnych dla 75 jednostek i 24 godzinnego okresu planowania). Proponowane w tej pracy rozwiązanie polega na przeformułowaniu modelu do postaci umożliwiającej zastosowanie techniki generacji kolumn.

Technika generacji kolumn jest oparta na skorygowanej metodzie simpleks, w której przechowuje się tylko aktualną macierz bazową. W każdym kroku wstawiamy do macierzy bazowej nową kolumnę opowiadającą zmiennej niebazowej, nie jest jednak istotne, czy nowa kolumna została wybrana z podanej 'explicite' macierzy ograniczeń, czy też została wyliczona w jakiś inny sposób. Najważniejsze jest, aby odpowiadająca tej kolumnie cena zredukowana była jak największa, a jeśli jest dodatnia (w przypadku zadania minimalizacji), to wprowadzenie nowej kolumny spowoduje poprawienie poprzedniego rozwiązania. Zadanie wyznaczenia nowej kolumny (tzw. *zadanie podrzędne*) możemy więc w sposób ogólny zapisać następująco:

$$\min_{a_\beta} \pi a_\beta - c_\beta \tag{11}$$

gdzie a_β jest szukanym wektorem zmiennych minimalizującym cenę zredukowaną, który jako nowa kolumna zostanie wprowadzony do macierzy bazowej, π - wektorem cen dualnych związanym z aktualną macierzą bazową, natomiast c_β - ceną w funkcji celu zadania, odpowiadającą znalezionej kolumnie i jest od niej na ogół zależną.

Oczywiście, nie każdy wektor a_β jest dopuszczalną kolumną z macierzy ograniczeń. O tym, jakie kolumny mogą zostać wprowadzone do macierzy bazowej, decyduje zbiór rozwiązań dopuszczalnych zadania (11). Na przykład można żądać, aby wszystkie elementy generowanych kolumn były liczbami całkowitymi.

3.1. Sformułowanie modelu

Wprowadźmy dodatkowe zmienne i oznaczenia.

$\beta_j \in \mathrm{B}_j$ zbiór indeksów dopuszczalnych harmonogramów pracy jednostki j,

$p_j^{\beta_j}$ wektor wartości mocy oddawanych do sieci przez jednostkę j w poszczególnych etapach planowania. Wektor ten stanowi harmonogram pracy jednostki; $p_j^{\beta_j} = (p_{j1}^{\beta_j}, p_{j2}^{\beta_j}, \ldots, p_{jH}^{\beta_j})$,

p_j^{+,β_j} wektor maksymalnych mocy jednostki j w kolejnych etapach planowania $p_j^{+,\beta_j} = (p_{j1}^{+,\beta_j}, p_{j2}^{+,\beta_j}, \ldots, p_{jH}^{+,\beta_j})$. Jeśli jednostka jest w stanie pracy, odpowiedni element p_{jh}^{+,β_j} wektora jest równy $p_j^{\max}$, w przeciwnym razie jest równy 0,

p_j^{-,β_j} analogiczny do poprzedniego wektor mocy minimalnych jednostki j,

$y_j^{\beta_j}$ zmienna binarna równa 1 wtedy i tylko wtedy, gdy harmonogram pracy β_j został wybrany dla jednostki j,

$K_j^{\beta_j}$ całkowity koszt wykonania harmonogramu β_j w jednostce j.

Model (1)-(7) można teraz zapisać następująco.

Zminimalizować $$\sum_{j\in J} \sum_{\beta_j \in \mathrm{B}_j} K_j^{\beta_j} y_j^{\beta_j} \tag{12}$$

przy ograniczeniach $$\sum_{j\in J} \sum_{\beta_j \in \mathrm{B}_j} p_{jh}^{\beta_j} y_j^{\beta_j} = D_h; \ \forall h \in H \tag{13}$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{\beta_j\in B_j} p_{jh}^{+,\beta_j} y_j^{\beta_j} \geq D_h^{+};\ \forall h\in H \tag{14}$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{\beta_j\in B_j} p_{jh}^{-,\beta_j} y_j^{\beta_j} \leq D_h^{-};\ \forall h\in H \tag{15}$$

$$\sum_{\beta_j\in B_j} y_j^{\beta_j} = 1;\ \forall j\in J \tag{16}$$

$$y_j^{\beta_j} \in \{0,1\};\ \forall j\in J, \beta_j\in B_j \tag{17}$$

Ograniczenia (13) zapewniają pokrycie prognozowanego zapotrzebowania na moc. Nierówności (14) i (15) pozwalają na utrzymanie niezbędnej rezerwy mocy. Równania (16) gwarantują zaś, że tylko jeden harmonogram zostanie wybrany dla j-tej jednostki. Ograniczenia techniczne danej jednostki, np. odpowiadające warunkom (8)-(10), zawarte są w kolumnach macierzy ograniczeń (13)-(15). W macierzy tej mogą się bowiem znajdować wyłącznie kolumny reprezentujące dopuszczalne harmonogramy pracy poszczególnych jednostek.

Oczywiście, niemożliwe jest rozwiązanie powyższego zadania w sposób bezpośredni. Z pomocą przychodzi technika generacji kolumn. Jej użycie uzależnione jest jednak od usunięcia warunku całkowitoliczbowości zmiennych $y_j^{\beta_j}$. W kolejnych iteracjach algorytmu w *zadaniu podrzędnym* są generowane, a następnie wprowadzane do bazy kolumny, poprawiające aktualne rozwiązanie. W zadaniu podrzędnym maksymalizujemy wartość ceny zredukowanej (11). Zauważmy, że ze względu na strukturę ograniczeń (13)-(15) nie możemy wygenerować nowej kolumny rozwiązując pojedyncze zadanie optymalizacji. Konieczny jest przegląd kolumn generowanych dla każdej z jednostek wytwórczych, co można zapisać następująco.

$$\max_{j\in J} y_{0j} = Z(j) + u_j,$$

gdzie $Z(j)$ jest wartością optymalną zadania wyznaczenia harmonogramu dla pojedynczej jednostki j, zaś u_j jest ceną dualną odpowiadającą j-temu ograniczeniu (16). Mamy więc do czynienia z dekompozycją zadania głównego na szereg zadań, z których każde dotyczy wyłącznie pojedynczej jednostki wraz z jej funkcją kosztów oraz z jej ograniczeniami technicznymi. Zadanie wyznaczenia harmonogramu dla jednostki j, maksymalizującego cenę zredukowaną, możemy zapisać następująco (dla czytelności pominięto większość indeksów j).

Zmaksymalizować $$\sum_{h\in H} t_h p_h + w_h^+ p_h^+ + w_h^- p_h^- - (K_h + S r_h) \quad (18)$$

przy ograniczeniach $$K_h \geq A_j^i p_h + B_j^i v_h;\ \forall i \in I, h \in H \quad (19)$$

$$p_j^{\min} v_h \leq p_h \leq p_j^{\max} v_h;\ \forall h \in H \quad (20)$$

$$p_h^+ = p_j^{\max} v_h;\ \forall h \in H \quad (21)$$

$$p_h^- = p_j^{\min} v_h;\ \forall h \in H \quad (22)$$

$$v_h - v_{h-1} = r_h - o_h;\ \forall h \in H \quad (23)$$

$$r_h + o_h \leq 1;\ \forall h \in H \quad (24)$$

$$r_{h+l} + o_h \leq 1;\ \forall h \in H, t = 1, \ldots, T_j - 1 \quad (25)$$

$$v_h, r_h, o_h \in \{0,1\};\ \forall h \in H \quad (26)$$

gdzie t_h jest ceną dualną odpowiadającą h-temu ograniczeniu (13), zaś w_h^+ oraz w_h^- są cenami dualnymi ograniczeń (14) i (15). Wyrażenie $\sum_{h\in H} K_h + S r_h$ wyznacza cenę $K_j^{\beta_j}$ w funkcji celu (12), odpowiadającą generowanemu harmonogramowi. Ograniczenia (19) pozwalają na modelowanie odcinkami liniowej funkcji kosztów generacji energii. Nierówności (20)-(22) zapewniają właściwe zachowanie zmiennych p_h, p_h^+ oraz p_h^- w stosunku do v_h. Pozostałe warunki wyrażają ograniczenia techniczne występujące w rozpatrywanej jednostce wytwórczej. Warto w tym momencie zauważyć, że ponieważ w zadaniu podrzędnym rozwiązuje się wyłącznie zadanie dla pojedynczej jednostki, możliwe jest modelowanie znacznie bardziej złożonych charakterystyk jednostki, niż było to możliwe w modelu klasycznym.

4. Heurystyczny algorytm naprawy harmonogramów niedopuszczalnych

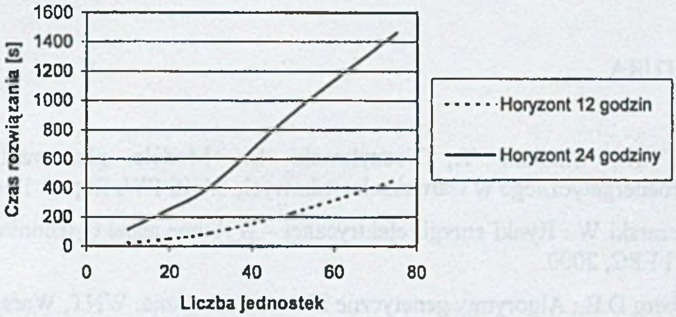
Zrezygnowanie z warunku binarności zmiennych $y_j^{\beta_j}$ jest konieczne, jeśli chce się rozwiązać zadanie (12)-(17) techniką generacji kolumn. Jednak skutkiem ubocznym takiej modyfikacji jest możliwość występowania dla niektórych jednostek harmonogramów niedopuszczalnych. Harmonogram, który będzie rozwiązaniem zadania dla takiej jednostki, może bowiem przybrać formę zdezagregowaną, tzn. danej jednostce przypisanych zostanie dwa lub więcej harmonogramów z ułamkowymi współczynnikami $y_j^{\beta_j}$. Wtedy co prawda każdy z harmonogramów przypisanych do danej jednostki jest dopuszczalny, jednak ponowna agregacja kilku takich harmonogramów nie musi prowadzić do harmonogramu dopuszczalnego.

Wyróżnić możemy dwie przyczyny niedopuszczalności harmonogramów, które zostały ponownie zagregowane. Pierwszą jest występowanie w takich harmonogramach etapów, w których generowana moc jest mniejsza od p_j^{min}. Drugą przyczyną są odstawienia o długości trwania mniejszej niż minimalny okres odstawienia danej jednostki.

W proponowanym algorytmie usuwania niedopuszczalności dla jednostek, dla których otrzymano niedopuszczalne harmonogramy zdezagregowane, tworzy się zupełnie nowe harmonogramy, zaś harmonogramy pozostałych jednostek są (mogą być) nieznacznie modyfikowane. Występują przy tym dwie fazy. W fazie pierwszej dla jednostek z harmonogramami niedopuszczalnymi tworzony jest nowy plan pracy – ustalane są dla nich wartości v_{jh}, a przez to stan, w jakim mają się znajdować w poszczególnych etapach. Nie narzuca się jednak konkretnych wartości generowanej mocy. Dla pozostałych jednostek przyjmuje się taki plan pracy określony przez v_{jh}, jaki otrzymano po zastosowaniu techniki generacji kolumn. Również tutaj nie narzuca się konkretnych wartości generowanej mocy. Stąd, po zakończeniu fazy pierwszej ustalone i znane są wartości wszystkich zmiennych $v_{j \in J, h \in H}$. W fazie drugiej rozwiązywany jest problem (1)-(7), który teraz jest zwykłym zadaniem programowania liniowego. Pozostaje jednak pytanie, w jaki sposób można generować dobre nowe plany pracy dla jednostek, którym w wyniku zastosowania techniki generacji kolumn przydzielone zostały harmonogramy niedopuszczalne. Otóż, przy rozwiązaniu tego zagadnienia wykorzystano fakt, że problem (1)-(7) z ustalonymi wartościami zmiennych v_{jh} może być bardzo szybko policzony przy użyciu jednego ze współczesnych solwerów liniowych. Stąd, zdecydowano się na zastosowanie algorytmów ewolucyjnych, których cechą charakterystyczną jest przeglądanie stosunkowo dużego podzbioru przestrzeni rozwiązań.

5. Wyniki eksperymentów

Wstępne eksperymenty obliczeniowe zostały przeprowadzone dla modelu uproszczonego poprzez usunięcie warunków (14) i (15) zapewniających zachowanie niezbędnego poziomu rezerwy mocy. Dodatkowo posłużono się liniową funkcją zależności kosztu od generowanej mocy. W testach korzystano szeroko z uniwersalnego pakietu CPLEX. Prezentowane wyniki zostały uzyskane na komputerze PC z procesorem Pentium 200MHz. Na rysunku 2 przedstawiono czasy wykonania algorytmu generacji kolumn w zależności od liczby jednostek, dla dwóch horyzontów planowania: 12 i 24 godzinnego. Otrzymane wyniki pokazują, że możliwe jest rozwiązywanie zadań o dość dużych rozmiarach – czas obliczeń dla 75 jednostek wytwórczych przy 24 godzinnym horyzoncie planowania zamknął się w granicy 1500 sekund. Czasy wykonania heurystycznego algorytmu naprawy harmonogramów dla 50 jednostek przy 12 i 24 godzinnym okresie planowania przedstawiono w tablicy 1. W tablicy 2 pokazano zaś przeciętny wzrost kosztów harmonogramu pracy 50 jednostek w wyniku naprawy. Podobnie jak poprzednio, wyniki przedstawiono dla 12 i 24 godzinnego okresu planowania.



Rys.2. Czas obliczeń w zależności od liczby jednostek dla 12 i 24 godzinnego okresu planowania

Fig.2. Solution time for different number of units and planning period lengths

Tablica 1

Średnie czasy obliczeń [s] dla 50 jednostek przy 12 i 24 godzinnym okresie planowania

Długość okresu planowania	Algorytm generacji kolumn	Naprawa harmonogramu	Sumaryczny czas wykonania
12	287	334	621
24	984	1266	2250

Tablica 2

Średnie koszty realizacji harmonogramów przed i po zastosowaniu algorytmu naprawy dla 50 jednostek przy 12 i 24 godzinnym okresie planowania

Długość okresu planowania	Koszt przed	Koszt po	Różnica względna
12	6319640	6355274	0.006
24	12627556	12779391	0.012

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono nowe podejście do znanego problemu doboru jednostek do pracy. Przeformułowanie modelu pozwoliło na zastosowanie technik generacji kolumn do jego rozwiązania. Niestety, harmonogramy otrzymywane dla niektórych jednostek są niedopuszczalne. Konieczne było opracowanie algorytmu korekcji takich harmonogramów dla wybranych jednostek. Wyniki wstępnych testów pokazują, że zastosowane podejście pozwala rozwiązywać zadania o praktycznych rozmiarach. Zagadnienie wymaga dalszych badań, szczególnie w zakresie zwiększenia efektywności algorytmu generacji kolumn i zastosowania go do rozwiązywania problemów, w których występują nieliniowe koszty generacji oraz uwzględniane są obowiązkowe rezerwy mocy.

LITERATURA

1. Sacha K., Sikorski T., Toczyłowski E.: Modele planowania pracy systemu elektroenergetycznego w warunkach rynkowych. IAiIS PW, Raport 14 (1999), pp.9-28.
2. Mielczarski W.: Rynki energii elektrycznej - Wybrane aspekty techniczne i ekonomiczne. ARE i EPC, 2000.
3. Goldberg D.E.: Algorytmy genetyczne i ich zastosowania. WNT, Warszawa 1995.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Sawik

Abstract

In centralized cost-based power energy market the system operator knowing characteristics and constraints of the market components, knowing the power demands and the reserve capacities schedules available power generating units on an hourly basis so that all the constraints are satisfied and the total generation cost is minimized. Classical unit commitment model incorporates a huge number of binary variables which makes it very hard to solve. We present a new formulation of the classical model which makes the use of the column generation method possible. Unfortunately some kind of relaxation must be done prior to the column generation algorithm. Thus, the resulting schedules are not always feasible. We show the heuristic that repairs the infeasible schedules for units that require this.