

VYUŽITÍ METOD PŘÍMÉHO HLEDÁNÍ OPTIMA PŘI PREDIKTIVNÍM ŘÍZENÍ

P. Chalupa, J. Novák

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Centrum aplikované kybernetiky

Abstrakt

Příspěvek se zabývá využitím přímých metod pro hledání optima v rámci prediktivního řízení. Na rozdíl od klasických regulačních úloh není úkolem řídit výstup určitého systému na základě uvažování jeho modelu. Cílem je optimální vykrytí predikovaného průběhu žádané hodnoty pomocí skupiny zdrojů. Úloha má použití pro systémy o více zdrojích, kde celkový výstup je dán součtem výstupů jednotlivých zdrojů a každý zdroj má určitá, pro něj specifická, omezení.

1 Definice problému

Základní problém vznikl při řešení úlohy prediktivního řízení v přenosové soustavě České republiky. Na rozdíl od klasických regulačních úloh není úkolem řídit výstup určitého systému na základě uvažování jeho modelu. Cílem je optimální vykrytí predikovaného průběhu výstupu pomocí skupiny zdrojů. Předikovaným průběhem je odchylka salda výkonu na hranicích ČR. Zdroje je možné si při určitém zjednodušení představit jako elektrárenské bloky.

Úloha má však obecnější použití pro soustavy o více zdrojích, kde celkový výstup je dán součtem výstupů jednotlivých zdrojů a každý zdroj má určitá, pro něj specifická, omezení. Také náklady na výstup jednotlivých zdrojů jsou obecně rozdílné.

Z regulačního hlediska je cílem optimální naplánování výroby jednotlivých zdrojů. Každý zdroj má danou cenu, za kterou jednotku energie vyrábí. Optimum je bráno z ekonomického hlediska dle následujícího přístupu:

1. Je třeba co nejlépe pokrýt požadovaný průběh celkového výstupu
2. Pokud je možné tohoto pokrytí dosáhnout více způsoby, je třeba najít ten s nejnižšími náklady

Komplikovanost úlohy spočívá především v technických omezeních jednotlivých zdrojů. Typicky se jedná o následující parametry:

- Maximální rychlost změny výstupu zdroje (případně doba, do které musí být požadovaná změna provedena)
- Maximální (minimální) výkon zdroje
- Schopnost zdroje měnit výkon spojitě nebo jen na úrovních zapnut / vypnuto (on/off)

V praxi je tento přístup využitelný především v kombinaci s metodou ustupujícího horizontu (receding horizon). Princip této metody spočívá v určení časových řad výstupů jednotlivých zdrojů na delší časové období (predikční horizont) a následném přepočítávání těchto řad po určitém čase, který je kratší než predikční horizont [1].

2 Ukázkový příklad

V této kapitole je pro ilustraci uveden základní případ, kdy soustava obsahuje 2 zdroje. Výstupní výkon soustavy je dán součtem výstupních výkonů obou zdrojů. Je znám požadovaný průběh výkonu soustavy na 5 hodin dopředu a cílem je navrhnout optimální produkci obou zdrojů na toto období.

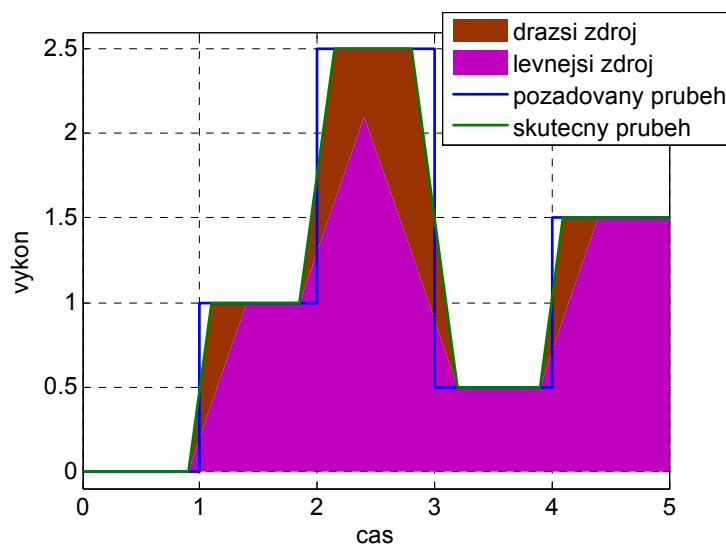
Omezujícími podmínkami jsou fyzikálními možnostmi obou zdrojů. Výstupní výkon zdrojů je možné měnit spojitě, a to jak pokud jde o čas, v němž ke změně dochází, tak pokud jde o velikost

změny. Velikost změny výkonu je však omezena. Pro každý zdroj je dána maximální rychlost zvyšování i snižování výkonu.

Náklady na jednotku výkonu jsou u obou zdrojů různé. Zdroj, který je schopen rychlejších změn výkonu má také dražší. Přesněji, jednotka energie vyprodukovaná tímto zdrojem je dražší, než u druhého zdroje.

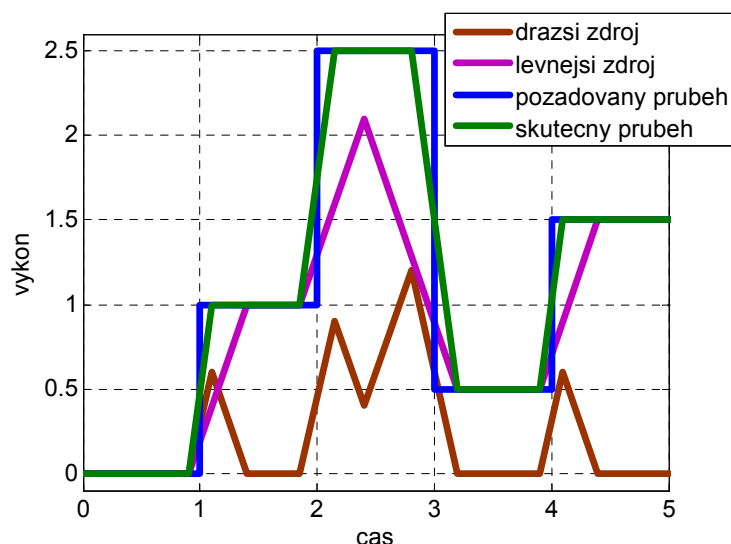
Při vykrývání odchylky je postupováno tak, jak je uvedeno v kapitole 1. Zásadní je co nejlepší vykrytí požadovaného průběhu výstupu soustavy. Pokud je možné tohoto vykrytí dosáhnout více způsoby, je preferováno ekonomicky výhodnější řešení, tedy využití levnějšího zdroje.

Průběh žádané hodnoty výstupu soustavy a její vykrývání jsou zobrazeny na obr. 1.



Obr. 1: Vykrývání požadovaného průběhu pomocí dvou zdrojů

Z obr. 1 je zřejmé, že nebylo možné zcela dosáhnout požadovaného průběhu výstupu soustavy a to proto, že požadovaný průběh obsahoval skokové změny. Průběh výstupů jednotlivých zdrojů je zanesen v obr. 2.



Obr. 2: Průběh výkonu jednotlivých zdrojů

Pro pokrytí požadovaného průběhu výstupu byl přednostně využíván levnější zdroj. Tento zdroj ovšem není schopen tak rychle měnit svůj výkon jako zdroj dražší. Proto byl především v okolí změn požadovaného výkonu využíván i dražší zdroj. Vzhledem k tomu, že průběh požadovaného výstupu je znám předem, mají oba zdroje možnost reagovat na změnu požadovaného výstupu dříve, než k ní

dojde. Tím je dosaženo menších odchylek od požadovaného průběhu než by tomu bylo v případě, že by zdroje reagovaly na změnu požadovaného výstupu až v době, kdy k této změně skutečně dojde.

3 Kriteriační funkce a omezující podmínky

Kritérium použité pro prediktivní řízení vychází z principů uvedených v kapitole 1. Obecně se jedná o minimalizaci součtu nákladů na zdroje (N_{zdroj}) a nákladů v důsledku odchylky ($N_{odchylka}$):

$$J = \min_{\mathbf{P}} \left(N_{odchylka} + \sum_{i=1}^{nz} N_{zdroj,i} \right) \quad (1)$$

kde nz představuje počet zdrojů a \mathbf{P} matici obsahující výkony jednotlivých zdrojů v rámci predikčního horizontu při určité periodě vzorkování. Při použití lineárních funkcí pro výpočet nákladů na odchylku a nákladů na zdroje, se jedná o úlohu lineárního programování. Výpočet nákladů na odchylku je možné provést prostým sečtením časové řady odchylek dle rovnice 2

$$N_{odchylka} = \sum_{k=1}^{nk} |e_k| \quad (2)$$

kde nk je počet vzorkovacích period v průběhu predikčního horizontu a e_k jsou odchylky mezi požadovaným a skutečným průběhem výstupu soustavy (regulační odchylka). Náklady na zdroj se počítají také jako lineární funkce výkonu zdroje:

$$N_{zdroj,i} = \lambda_i \sum_{k=1}^{nk} |\mathbf{P}_{i,k}| \quad (3)$$

kde λ_i je váha odpovídající ceně jednotky energie z daného zdroje. Aby byla přednostně minimalizována odchylka, musí být všechny váhy menší než 1 ($\lambda_i < 1$).

Některé zdroje však mají také určité náklady na startování, které je třeba při výpočtu nákladů na zdroj uvažovat. Náklady na zdroj je pak třeba počítat jako funkcionář řady \mathbf{P}_i , který uvažuje i časový průběh této řady. Uvažovat pouze hodnoty řady \mathbf{P}_i nestačí, protože např. dvě nulové hodnoty v této řadě mohou znamenat, že:

- nedošlo k nastartování zdroje ani jednou (pokud jsou za sebou na konci řady)
- došlo k nastartování zdroje jednou (pokud jsou za sebou, ale ne na konci řady, nebo nejsou za sebou a jedna z nich je na konci řady)
- došlo ke dvěma nastartováním zdroje (pokud nejsou za sebou a ani jedna není na konci řady)

Zásadními omezujícími podmínkami jsou vlastnosti jednotlivých zdrojů. Problémem je především spojitost změn výkonu zdroje a to jak v čase, tak v hodnotě. Mohou nastat 4 základní případy:

1. Požadovaný výkon zdroje je možné měnit spojitě jak v čase, jak v hodnotě. Tedy v libovolném čase je možné změnit žádaný výkon zdroje na libovolnou hodnotu.
2. Požadovaný výkon zdroje je možné měnit spojitě v čase a diskrétně v hodnotě. Změnu je tedy možné provést v libovolném čase, ovšem požadovaná hodnota musí být z určité množiny přípustných hodnot. V limitním případě pracuje zdroj jen v režimu zapnuto/vypnuto.
3. Požadovaný výkon zdroje je možné měnit diskrétně v čase a spojitě v hodnotě. Změnu je tedy možné provést pouze v předem daných časech, ovšem velikost požadovaného výkonu je libovolná.
4. Požadovaný výkon zdroje je možné měnit diskrétně v čase i hodnotě. Změnu je tedy možné provést pouze v předem daných časech a požadovaný výkon musí z určité množiny přípustných hodnot.

Požadovaný výkon zdroje však nemusí vždy odpovídat jeho skutečnému výkonu. Je třeba respektovat fyzikální možnosti zdrojů. Tedy především minimální a maximální výkon zdroje a maximální rychlost nárůstu a klesání výstupního výkonu.

4 Minimalizace kritéria přímým hledáním pomocí genetických algoritmů

Obecný problém popsany v kapitole 1 a 3 byl otestován na hypotetických případech prediktivního řízení v přenosové elektrizační soustavě. Zdroje uváděné v kapitole 3 odpovídají elektrárenským blokům, které poskytují tzv. podpůrné služby. Podpůrné služby slouží k vykrývání neplánovaných odchylek výkonu v soustavě.

Byly uvažovány následující podpůrné služby, které sestávají z jednotlivých elektrárenských bloků:

TR+ – kladná terciární regulace

TR- – záporná terciární regulace

QS – quickstart, rychle startující záloha

DZ – dispečerská záloha, pomalejší start

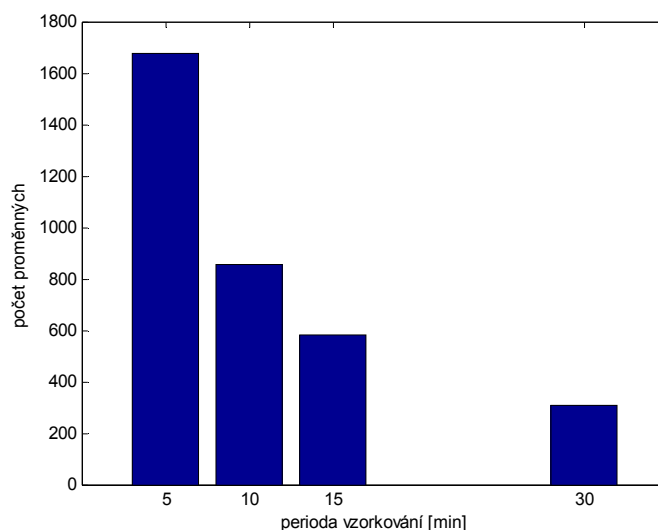
EregZ – nákup energie ze zahraničí

Cílem úlohy bylo nalézt optimální nastavení jednotlivých bloků při predikčním horizontu 6h. Kromě bloků zapojených do *QS* a *EregZ* pracují všechny ostatní bloky v binárním režimu zapnuto/vypnuto. Dále je samozřejmě nutné respektovat další omezení jednotlivých bloků [2].

Řešení problému bylo prováděno s využitím nástrojů systému MATLAB [3] a jeho toolboxů [4]. Binární charakter vstupů představuje výraznou nelinearitu v řešené úloze a zásadně omezuje použitelnost optimalizačních metod založených na využití derivace kritériální funkce.

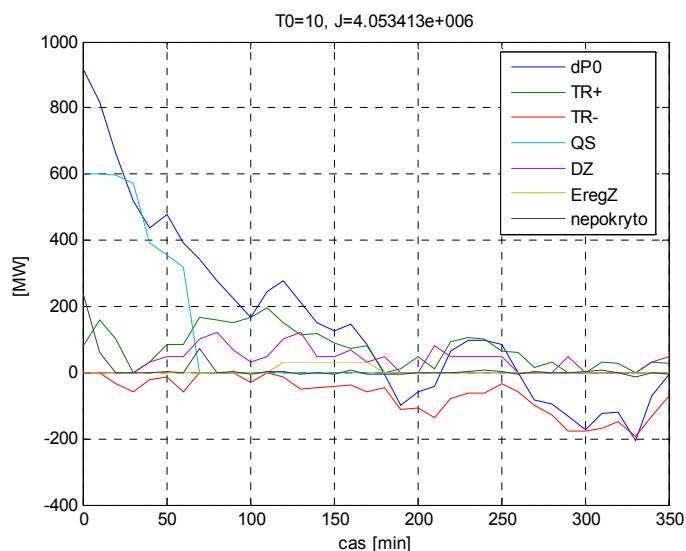
Jednou z metod řešení problému je využití modifikované metody prohledání minima, která zohledňuje diskretnost některých vstupů [5].

Řešení použité dále je však založeno na využití genetických algoritmů pro hledání minima funkce. Veškeré vstupy byly převedeny na binární hodnoty, které pak byly použity v optimalizačním algoritmu. Počet proměnných, které vstupují do kritéria, závisí na použité periodě vzorkování. Tato závislost je zanesena v obr. 3.



Obr. 3: Závislost počtu proměnných na periodě vzorkování

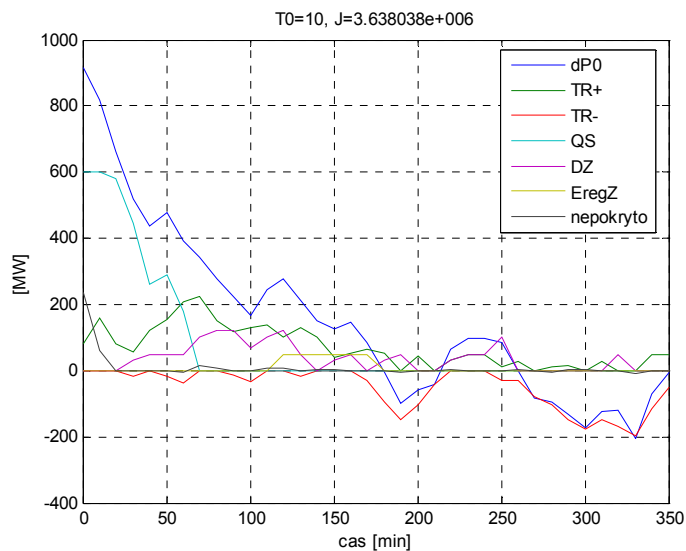
Základní výsledek hledání minima kritériální funkce pomocí genetických algoritmů je zanesen na obr. 4. Průběh *dPO* představuje predikovaný průběh odchylky v soustavě, která má být vykryta podpůrnými službami. Průběh *nepokryto* odpovídá odchylce v soustavě, kterou se nepodařilo vykryt podpůrnými službami.



Obr. 4: Základní výsledek optimalizace

Problém, který se ve výsledných průbězích vyskytl je protiregulace, tedy použití kladných a záporných podpurných služeb v jednom okamžiku. Toto nasazení není nezbytné a svědčí o tom, že se optimalizačnímu algoritmu nepodařilo najít globální minimum kritériální funkce.

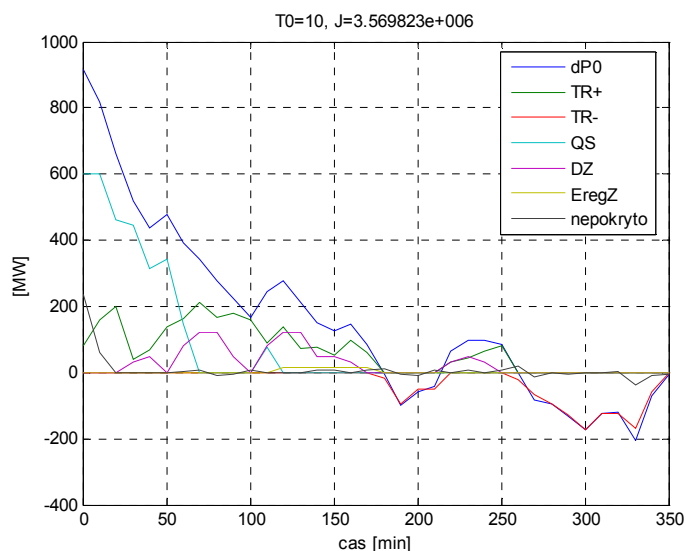
Jednou z možností, jak se optimu více přiblížit, je zvětšení velikosti populace použité v genetickém algoritmu. Průběhy na obr. 4 odpovídají populaci 500 jedinců, zvětšením na 5000 bylo dosaženo průběhů uvedených na obr. 5.



Obr. 5: Výsledek optimalizace po zvětšení populace

Je zřejmé, že protiregulace je výrazně omezena oproti předchozímu případu, což vedlo ke snížení hodnoty kritériální funkce asi o 10%.

Jinou možností, jak se vypořádat s protiregulací, je její explicitní potlačení přímo v optimalizačním algoritmu. Tento způsob však představuje zásah přímo do kritériální funkce a omezuje tedy možnosti hledání minima. Výsledný průběh pro původní velikost populace (500 jedinců) je zanesen na obr. 6.



Obr. 6: Explicitní zamezení protiregulaci

K protiregulaci samozřejmě nedochází, ovšem je třeba poznamenat, že v tomto případě je výrazně potlačena výhoda prediktivního přístupu, tedy možnost reagovat na predikované změny dříve, než tyto skutečně nastanou. Přehled výsledků uvedených nastavení je shrnut v tabulce 1.

Tab. 1: POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH NASTAVENÍ OPTIMALIZAČNÍHO ALGORITMU

Nastavení	Velikost populace	Hodnota kritéria [10^6]	Čas optimalizace [s]	Poznámka
1	500	4,05	177	
2	5000	3,64	2767	
3	500	3,57	198	Explicitní vyloučení protiregulace

5 Závěr

V článku byla prezentována optimalizační úloha založená na hledání optima pomocí genetických algoritmů. Komplikovanost úlohy spočívá především ve velkém množství proměnných a diskretnosti některých vstupů. Proto byl proveden převod všech vstupů do binární podoby a takto modifikovaná úloha byla řešena s využitím genetických algoritmů.

Tento přístup byl otestován na hypotetickém problému prediktivní regulace odchylky salda výkonu v přenosové elektrizační soustavě. Prezentované výsledky ukazují na vhodnost navrženého přístupu pro tuto úlohu, s tím že v další činnosti bude třeba se zabývat vhodným nastavením genetických algoritmů.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory grantů MŠMT ČR číslo 1M0567 a GA ČR číslo 102/06/P286.

Literatura

- [1] W. H. Kwon, S. Han, *Receding Horizon Control*. Springer-Verlag, London, 2005.
- [2] O. Novák, T. Strnad, P. Horáček. *Dispečerská pravidla provozovatele přenosové soustavy*. Výzkumná zpráva, Centrum aplikované kybernetiky, ČVUT, Praha 2007
- [3] *MATLAB Programming* [online]. [cit 2007-10-20]. < http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/matlab/matlab_prog.pdf>
- [4] *Optimization Toolbox User's Guide*, The Mathworks Inc., USA, 2007.

[5] Solberg, I.: *fminconset* [online]. [cit 2007-07-09]. Dostupné z MATLAB File Exchange <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=96&objectType=File>>.

Petr Chalupa

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Centrum aplikované kybernetiky
Nad Stráněmi 4511, 76005 Zlín

Email: chalupa@fai.utb.cz

Jakub Novák

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, Centrum aplikované kybernetiky
Nad Stráněmi 4511, 76005 Zlín

Email: jnovak@fai.utb.cz