

Mirosław KIELBON

## WYBRANE ASPEKTY MODELOWANIA DYNAMICZNEGO UKŁADÓW WYSOKIEGO NAPIĘCIA PRĄDU STAŁEGO (WNPS)

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono porównanie dwóch nowoczesnych programów symulacyjnych: NETOMAC oraz ATP przy modelowaniu układów wysokiego napięcia prądu stałego. Badania przeprowadzono na przykładzie monopolarnej linii przesyłowej 400 kV. Wyniki wykazały, że model stabilnościowy NETOMAC wykonuje obliczenia w najkrótszym czasie, ale z dokładnością mniejszą aniżeli model przejściowy NETOMAC lub model w ATP.

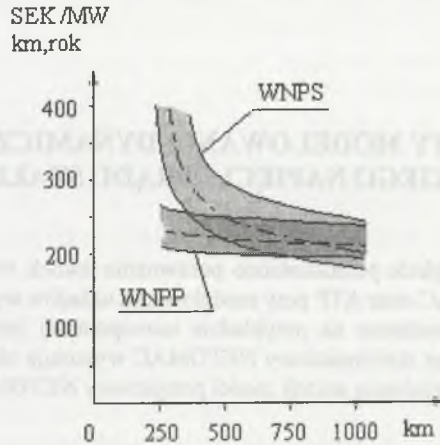
## SOME ASPECTS OF DYNAMIC MODELLING OF HVDC SYSTEMS

**Summary.** The paper shows comparison of two modern simulation programs: NETOMAC and ATP applied to modelling HVDC systems. Investigations have been made for a monopolar transmission line 400 kV. Results have shown that the advanced stability model NETOMAC makes calculation in the shortest time, but with smaller accuracy than the transient model in NETOMAC or model in ATP.

### 1. WSTĘP

Elektroenergetyka polska rozważa w najbliższych latach uruchomienie układów przesyłowych, umożliwiających lepsze i pewniejsze powiązanie Krajowego Systemu Elektroenergetycznego z systemami państw zachodnich, przy czym w fazie realizacji znajduje się połączenie Polski ze Szwecją (system NORDEL) za pomocą kabla podmorskiego, natomiast w fazie planowania jest tzw. Most Wschód-Zachód, który łącząc systemy elektroenergetyczne RFN i Rosji będzie zapewniał eksport energii elektrycznej z Rosji do systemu UCTPE. W grę wchodzi tu przesył mocy rzędu kilku GW na odległość rzędu 1500 km [3]. Ze względu na koszty przesyłu (rys.1) przy tak dużej mocy ekonomicznie uzasadniona wydaje się budowa linii wysokiego napięcia prądu stałego (WNPS) [1]. Linia ta będzie połączona z Krajowym Systemem Elektroenergetycznym za pomocą odczepowej stacji przekształtnikowej. Ze względu na to celowe jest przeprowadzenie badań symulacyjnych,

pozwalających określić, jaki będzie wpływ tej linii na pozostałe elementy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego.



Rys. 1. Porównanie kosztów przesyłu w funkcji odległości dla linii przesyłających moc 500 MW WNPS i WNPP

Fig. 1. Comparison of transmission costs (as length line function) for 500 MW power transmitting HVDC and HVAC lines

## 2. UKŁADY PRZESYŁOWE WYSOKIEGO NAPIĘCIA PRĄDU STAŁEGO

Przesył energii elektrycznej liniami prądu stałego w porównaniu z przesyłem liniami prądu przemiennego posiada wiele zalet. Pierwszą z nich jest brak zjawisk falowych w linii, co powoduje, że przesył może się odbywać na bardzo duże odległości. Brak składowej biernej prądu powoduje zaś, że straty przesyłu i spadki napięć w liniach przesyłowych prądu stałego są mniejsze niż w liniach prądu przemiennego transportujących tę samą moc. Przesyłana moc czynna nie zależy ani od częstotliwości w systemie elektroenergetycznym współpracującym z linią WNPS, ani od przesunięć fazowych - za pomocą linii WNPS można więc łączyć systemy elektroenergetyczne pracujące niesynchronicznie lub z różnymi częstotliwościami. Ważną zaletą linii WNPS w połączeniu z sieciami prądu przemiennego jest też ograniczanie prądów zwarciovych i tłumienie oscylacji mocy przesyłowych w stanach zakłóceńowych.

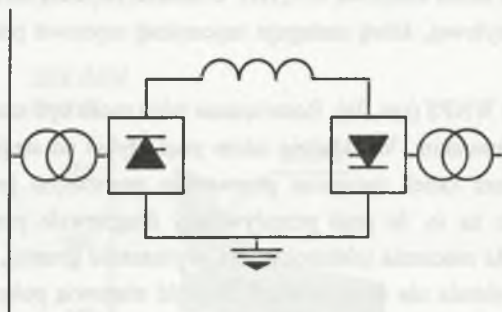
Obecnie istnieje kilka konfiguracji systemów przesyłu prądem stałym [2, 3, 4]:

- Połączenie typu sprzęgła sieciowego („back to back”). Rozwiązanie to jest często stosowane przy połączeniach systemów elektroenergetycznych pracujących niesynchronicznie (np. sprzęgło Durnrohr (Czechy-Austria) czy Etzenricht (Czechy-Niemcy)) lub systemów

o różnych częstotliwościach (np. sprzęgło Sakuma w Japonii lub sprzęgła niemieckie, łączące sieć 50 Hz z siecią kolejową  $16\frac{2}{3}$  Hz). Charakterystyczną cechą takiego połączenia jest brak linii przesyłowej, którą zastępuje najczęściej szynowe połączenie prostownika i falownika (rys.2).

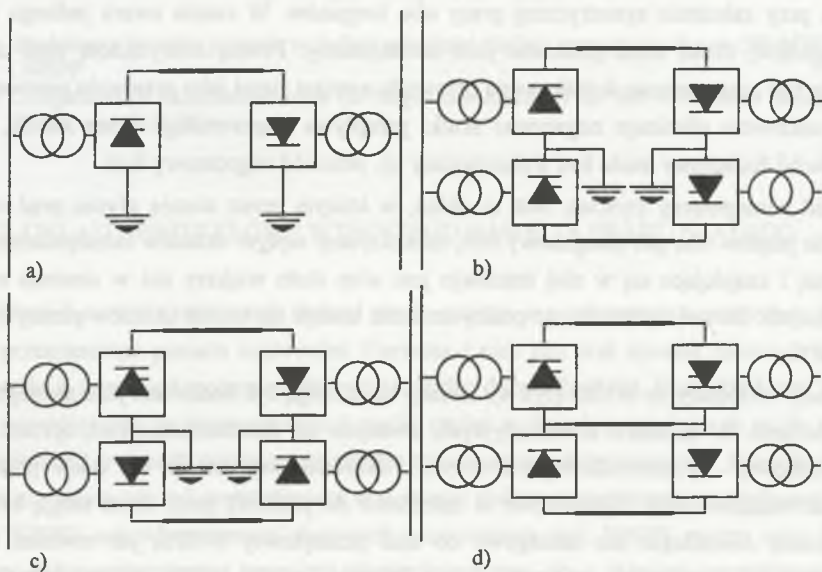
- b) Układ monopolarny WNPS (rys. 3a). Rozwiązanie takie może być stosowane przy przesyłaniu energii kablem podmorskim. W układzie takim prąd płynie od stacji prostownikowej do falownikowej poprzez kabel, natomiast przewodem powrotnym jest woda morską lub ziemia. Ze względu na to, że prąd przepływający długotrwale przez ziemię wywołuje negatywne skutki dla otoczenia (elektrokorozja, wysuszenie gruntu), układy monopolarne linia napowietrzna-ziemia nie są stosowane. Wyjątki stanowią połączenia kabli podmorskich ze stacjami przekształtnikowymi (np. linia Fenno-Skan - 33 km linii napowietrznej).
- c) Układ bipolarny WNPS (rys.3b). Rozwiązanie to jest najpopularniejsze przy budowie napowietrznych linii WNPS. Przekształtniki w układzie bipolarnym są dzielone (najczęściej na dwa mostki sześciopulsowe), a ich część środkowa - uziemiona. Przez ziemię płynie prąd równy różnicy prądów płynących w poszczególnych biegunach linii, a więc bliski zeru przy założeniu symetrycznej pracy obu biegunów. W czasie awarii jednego z pól (biegunów) układ może pracować jako monopolarny. Pewną modyfikacją tego układu może być zastosowanie dodatkowego przewodu zamiast ziemi jako przewodu powrotnego, co całkowicie eliminuje negatywne skutki przepływu prądu stałego przez ziemię. Jako przewód dodatkowy może być wykorzystany np. przewód odgromowy linii.
- d) Układ homopolarny (rys.3c). Jest to układ, w którym przez ziemię płynie prąd równy sumie prądów obu pól (biegunów) linii, niekorzystny wpływ układów homopolarnych na ziemię i znajdujące się w niej instalacje jest więc dużo większy niż w sieciach monopolarnych. To zadecydowało, że praktycznie nie buduje się takich układów przesyłowych WNPS.
- e) Układy wielostacyjne WNPS (rys. 4). Układy takie mogą być budowane jako monopolarne i bipolarne. W układach wielostacyjnych, zwanych też multiterminalnymi, oprócz stacji początkowej - prostownikowej i końcowej - falownikowej istnieją też stacje pośrednie (prostownikowe bądź falownikowe w zależności od potrzeb), przy czym mogą być one włączone równolegle lub szeregowo do linii przesyłowej WNPS, jak również mogą występować rozwiązania mieszane. Most Wschód-Zachód będzie najprawdopodobniej układem wielostacyjnym równoległym (wszystkie przekształtniki będą włączone równolegle do linii WNPS), ze stacją przekształtnikową na terenie Polski (rys. 4a).





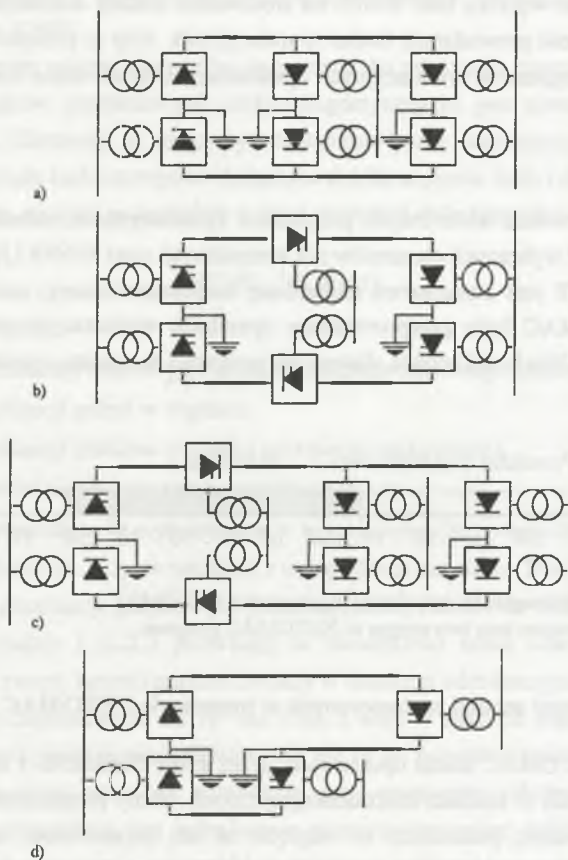
Rys. 2. Sprzęgło sieciowe prądu stałego

Fig. 2. The „back to back” HVDC connection



Rys. 3. Konfiguracje spotykanych dwustacyjnych sieci WNPS: a) układ monopolarny, b) układ bipolarny, c) układ homopolarny, d) układ bipolarny z dodatkowym przewodem powrotnym

Fig. 3. Configuration of two-terminal HVDC systems: a) monopolar system, b) bipolar system, c) homopolar system, d) bipolar system with an additional return conductor



Rys. 4. Konfiguracja wielostacyjnych układów WNPS: a) układ bipolarny równoległy, b) układ bipolarny szeregowy, c) układ bipolarny mieszany, d) układ bipolarny z dzielonym przekształtnikiem

Fig. 4. Configuration of multiterminal HVDC systems: a) bipolar parallel system, b) bipolar series system, c) bipolar mix system, d) system with divided inverter

### 3. MODELE ELEMENTÓW SYSTEMU ELEKTROENERGETYCZNEGO DO ANALIZY ZJAWISK PRZEJŚCIOWYCH

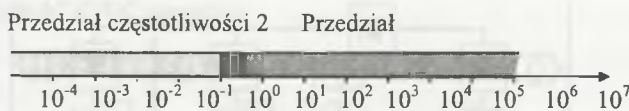
Linie WNPS mogą wpływać na otaczające je środowisko, czyli otaczające linię WNPS układy i urządzenia elektryczne, takie jak wyłączniki, linie prądu przemiennego wprowadzające i wyprowadzające energię ze stacji przekształtnikowych wraz z ich układami zabezpieczeń, jak również skrzyżowania i zbliżenia z układami przesyłowymi prądu przemiennego.

Nie wszystkie wpływy linii WNPS na środowisko zostały dokładnie zbadane, dlatego zachodzi konieczność prowadzenia badań symulacyjnych. Aby je przeprowadzić, można korzystać z wielu programów symulacyjnych opracowanych przez różne firmy, wśród których najważniejsze są:

- a) NETOMAC,
- b) ATP.

Istnieje oczywiście wiele innych programów symulacyjnych, jednak są one przydatne bardziej do analizy wybranych elementów niż kompletnych sieci WNPS [3].

Program ATP jest stosunkowo najbardziej rozpowszechniony, natomiast za pomocą programu NETOMAC były przeprowadzane symulacje wielostacijnego połączenia Rosji z Niemcami (most Wschód-Zachód), dlatego też programy te zostaną opisane poniżej.



Rys. 5. Podział częstotliwości na przedziały w programie NETOMAC  
 Fig. 5. Frequency division into two ranges in NETOMAC program

### 3.1. Ogólny opis modeli zastosowanych w programie NETOMAC

Program NETOMAC został opracowany przez firmę SIEMENS i służy do obliczania stanów nieustalonych w sieciach elektroenergetycznych. Stany przejściowe, do których program ma zastosowanie, podzielono ze względu na ich częstotliwość na dwa przedziały (rys. 5). W przedziale częstotliwości 1 (od  $10^0$  do  $10^7$  Hz) mogą być przeprowadzane obliczenia dotyczące np. przepięć łączeniowych, generacji harmonicznych, stanów nieustalonych podczas zwarć itp., natomiast w przedziale 2 (od  $10^{-4}$  do 5 Hz) - obliczenia związane ze stabilnością systemu oraz z regulacją, np. turbin lub generatorów. W każdym z przedziałów mają zastosowanie nieco inne modele dynamiczne, co więcej, modele te mogą być w trakcie obliczeń i przejścia z jednego przedziału częstotliwości do drugiego zmieniane (przełączane), przez co czas obliczeń jest krótszy, niż gdyby całe obliczenia były przeprowadzane na jednym tylko typie modelu [5]. Program NETOMAC sprawdził się m.in. przy symulacjach zachowania się systemów elektroenergetycznych podczas symetrycznych lub niesymetrycznych zwarć, zrzutów obciążenia, niewłaściwych synchronizacji maszyn synchronicznych, rezonansów subharmonicznych, podczas stosowania kompensacji szeregowej w sieciach, przejść transformatorów w stan nasycenia podczas ich pracy itp. Biblioteki programu zawierają elementy RLC pasywne liniowe i nieliniowe, czwórnikowe modele przewodów, modele transformatorów z uwzględnieniem nieliniowości ich charakterystyk i grupy połączeń, modele



maszyn synchronicznych i asynchronicznych wraz z układami ich regulacji oraz elementy sieci przesyłowych WNPS.

Matematycznym opisem elementów pasywnych dla przedziału częstotliwości od  $10^0$  do  $10^6$  Hz (zakres stanów przejściowych elektromagnetycznych) jest równanie różniczkowe pierwszego rzędu. Elementy te mogą być zastąpione przez admitancję  $Y_{ik}$  i równolegle dołączone źródło prądu bądź szeregowo dołączone źródło napięcia. Jeśli tylko wartości napięć tych źródeł są znane, rozkład potencjałów w sieci może być obliczany jako:

$$U^{-1} = Y_{ad}^{-1} \cdot K \cdot Y \cdot e(t), \quad (1)$$

gdzie:

$Y_{ad}$  - macierz admitancji węzłowych (zależna od kroku czasowego całkowania),

$K$  - macierz incydencji gałęzi w węzłach,

$Y$  - macierz admitancji (zależna od kroku czasowego całkowania),

$e(t)$  - macierz źródeł napięcia w gałęziach (dla chwili  $t$ ),

Obliczenia dynamiczne są wykonywane w oryginalnym (bez przeliczeń na np. składowe symetryczne) układzie L1L2L3, ewentualnie z uwzględnieniem ziemi. Dla przypadków symetrycznych macierz admitancji gałęziowych jest diagonalna, co ułatwia obliczenia. Obliczenia w oryginalnym układzie L1L2L3 pozwalają na stosunkowo łatwe odwzorowanie stanów przejściowych (np. zwarc, łączeń) poprzez zmiany w macierzy admitancyjnej.

W przedziale częstotliwości od  $10^{-4}$  do 5 Hz, a więc w zakresie stanów przejściowych elektromechanicznych, gałęzie sieci trójfazowych nie są już przedstawiane za pomocą równań różniczkowych, ale przez zespolone admitancje, przy czym przy założeniu symetrycznych stanów łączeniowych możliwe jest jednofazowe przedstawienie sieci trójfazowych. Przez to quasi-stacjonarne odwzorowanie jest przybliżana jedynie zależność parametrów sieci przesyłowej od częstotliwości, wobec czego prawidłowo przetwarzane będą jedynie przebiegi dynamiczne o częstotliwościach niezbyt odbiegających od częstotliwości znamionowej.

Ze względu na przyjęte uproszczenia można zastosować w programie nieco większy krok całkowania, a co za tym idzie - zmniejszyć czas obliczeń.

Maszyny wirujące (synchroniczne i asynchroniczne) są odwzorowywane w programie NETOMAC jako elementy aktywne. W przypadku maszyn synchronicznych skorzystano tu z możliwości transformacji dwuosiowej maszyn synchronicznych, przy czym układy równań różniczkowych w osiach  $d$  i  $q$  są tworzone w oparciu o schematy zastępcze składające się z impedancji (admitancji) i dołączonego do niej szeregowo źródła napięcia lub też równolegle dołączonego źródła prądu. Do modeli maszyn wprowadzone są nieliniowości wynikające z uwzględnienia momentu obrotowego maszyn oraz nasycania się rdzeni.

Najdokładniejsze modele maszyn synchronicznych uzyskuje się, uwzględniając równanie różniczkowe sieci oraz wyznaczając napięcie  $\frac{dy}{dt}$  w osi wzdłużnej lub poprzecznej.

Można oczywiście uprościć obliczenia pomijając napięcia transformacji, lecz wtedy program nie uwzględni zanikania składowej stałej. Aby ją uwzględnić, można zastosować obliczanie przebiegów dla wartości chwilowych (uwzględniając napięcie rotacji i transformacji) tak długo, dopóki składowa stała nie zaniknie, później zaś można przełączyć obliczenia na inny, uproszczony model, pozwalający na zwiększenie kroku czasowego i skrócenie czasu obliczeń.

Układy przesyłowe WNPS w przedziale częstotliwości 2 (stabilność) mogą być modelowane dla podstawowych harmonicznych, co wystarcza do badań dynamicznego zachowania się systemów WNPS przy pracy równoległej z siecią prądu przemiennego lub przy klasycznych połączeniach dwóch systemów prądu przemiennego za pomocą linii WNPS.

Układy regulacyjne są odwzorowane w programie NETOMAC w postaci gotowych „modułów” będących np. członami opóźniającymi, różniczkującymi, całkującymi, z których można budować dowolne regulatory.

Zupełnieniem programu NETOMAC jest moduł, pozwalający na obliczanie mechanicznych drgań skrętnych elementów wirujących maszyn elektrycznych.

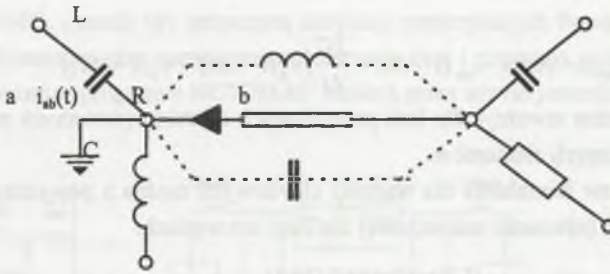
Podczas przeprowadzania symulacji i konieczności rozwiązywania równań różniczkowych program NETOMAC korzysta z trapezowej metody całkowania numerycznego, która jest zawsze stabilna, choć może mniej dokładna niż inne metody.

Surowe wyniki symulacji są obrabiane i przedstawiane w postaci wygodnych do odczytu wykresów lub tabel za pomocą programów pomocniczych do NETOMACa.

### 3.2. Zarys metody numerycznej zastosowanej w programie ATP

Program ATP powstał, podobnie jak NETOMAC, około 20 lat temu. Jest on stale rozwijany przez trzy ośrodki: Bonneville Power Administration w Portland (USA), UBC (University of British Columbia) w Vancouver (Kanada) oraz EPRI. Program ten jest adaptacją do potrzeb maszyn cyfrowych programów używanych uprzednio do analogowych symulacji systemów elektroenergetycznych [6]. Opracowano wiele wersji programu, indywidualnie dostosowanych do rodzaju używanego sprzętu komputerowego. Inaczej niż w programie NETOMAC, w ATP nie występuje podział częstotliwości na przedziały, a krok czasowy jest stały podczas całego toku obliczeń. Za pomocą programu ATP można przeprowadzać obliczenia w sieciach elektroenergetycznych, zawierających dowolne układy liniowych elementów RLC, linii przesyłowych przedstawionych jako linie składające się z łańcucha wielofazowych czwórników typu  $\Pi$  lub linie o parametrach rozłożonych, transformatorów z uwzględnieniem nasycania się ich rdzeni i pętli histerezy, pojedynczych źródeł napięcia i prądu, maszyn synchronicznych (lub innych maszyn wirujących reprezentowanych jako maszyna uniwersalna), wyłączników, ograniczników przepięć, systemów sterowania i regulacji, stacji WNPS i innych. ATP sprawdził się wielokrotnie przy analizowaniu różnego rodzaju dynamicznych stanów przejściowych.





Rys. 6. Fragment sieci elektrycznej z wyszczególnionymi węzłami a, b  
 Fig. 6. Fragment of electric network with specified nodes a, b

Zmiennymi stanu w programie ATP są napięcia węzłowe. W związku z tym wszystkie prądy gałęziowe są obliczane jako funkcje zmiennych stanu. Jeżeli np. pomiędzy węzłem a i b (rys. 6) znajduje się rezystancja, to prąd między tymi węzłami będzie:

$$i_{ab} = \frac{1}{R} [v_a(t) - v_b(t)], \quad (2)$$

gdzie  $v_a(t)$ ,  $v_b(t)$  są napięciami (potencjałami) węzłów a i b.

Dla indukcyjności, która może być opisana równaniem różniczkowym:

$$v = L \frac{di}{dt}, \quad (3)$$

zastosowano zastąpienie tego równania za pomocą równania różnicowego:

$$\frac{v(t) + v(t - \Delta t)}{2} = L \frac{i(t) - i(t - \Delta t)}{\Delta t}, \quad (4)$$

z którego po przekształceniu łatwo wyliczyć prąd (załóżmy, że indukcyjność znajduje się pomiędzy węzłami a i b):

$$i_{ab} = \frac{\Delta t}{2L} (v_a(t) - v_b(t)) + \text{hist}_{ab}(t - \Delta t), \quad (5)$$

gdzie  $\text{hist}_{ab}(t - \Delta t)$  jest wyrażeniem zależnym wyłącznie od stanu układu w poprzednim kroku czasowym:

$$\text{hist}_{ab}(t - \Delta t) = i_{ab}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} (v_a(t - \Delta t) - v_b(t - \Delta t)). \quad (6)$$

Jeżeli między węzłami umieszczona jest pojemność, otrzymujemy przez analogię:

$$i_{ab}(t) = \frac{2C}{\Delta t} [v_a(t) - v_b(t)] + \text{hist}_{ab}(t - \Delta t) \quad (7)$$

oraz

$$\text{hist}_{ab}(t - \Delta t) = -i_{ab}(t - \Delta t) - \frac{2C}{\Delta t} (v_a(t - \Delta t) - v_b(t - \Delta t)). \quad (8)$$

Podobne równania można utworzyć dla linii przesyłowych charakteryzowanych parametrami rozłożonymi oraz dla innych elementów.

Korzystając z praw Kirchhoffa dla wartości chwilowych można z powyższych równań utworzyć układ równań (równanie macierzowe) dla sieci o  $n$  węzłach:

$$[\mathbf{G}][\mathbf{v}(t)] = [\mathbf{i}(t)] - [\mathbf{hist}], \quad (9)$$

gdzie:

$[\mathbf{G}]$  - macierz konduktancji węzłowych (symetryczna  $n \times n$ ),

$[\mathbf{v}(t)]$  - wektor  $n$  napięć węzłowych,

$[\mathbf{i}(t)]$  - wektor  $n$  źródeł prądowych,

$[\mathbf{hist}]$  - wektor  $n$  znanych wyrażeń „historii” układu.

Ze względu na to, że napięcia niektórych węzłów są znane, powyższe równanie macierzowe można rozpaść na dwie grupy: grupę A (węzły z nieznanymi napięciami) i grupę B (węzły ze znanymi napięciami). Nieznane napięcia można wówczas znaleźć, rozwiązując równanie macierzowe:

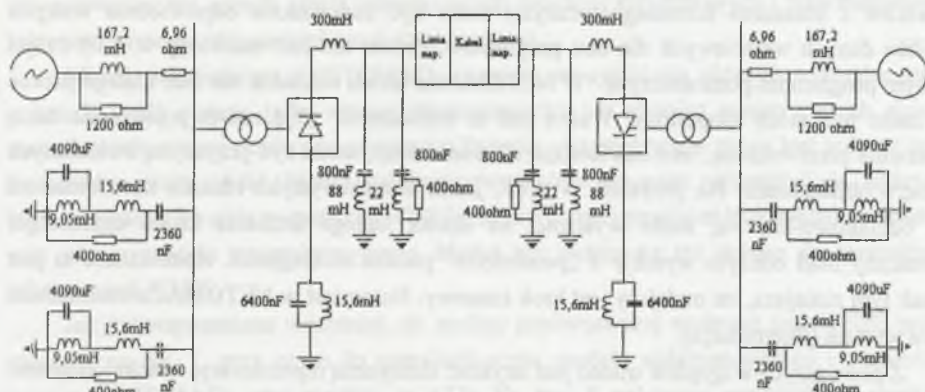
$$[\mathbf{G}_{AA}][\mathbf{v}_A(t)] = [\mathbf{i}_A(t)] - [\mathbf{hist}_A] - [\mathbf{G}_{AB}][\mathbf{v}_B(t)]. \quad (10)$$

Do prawidłowej pracy program EMTP wymaga każdorazowo ustalenia macierzy (wektora)  $[\mathbf{hist}]$  dla pierwszego kroku czasowego, czyli warunków początkowych. W najnowszych wersjach programu EMTP stan ustalony może być obliczany automatycznie na początku analizy stanu nieustalonego.

#### 4. OCENA PRZYDATNOŚCI OPROGRAMOWANIA ATP I NETOMAC DO SYMULACJI ZJAWISK PRZEJŚCIOWYCH W UKŁADACH WNPS

Każdy z programów, zarówno ATP, jak i NETOMAC, posiada swoje zalety i wady przy symulacji systemów WNPS. Program ATP na przykład oferuje możliwość interaktywnego wykonywania, obserwacji i kontroli symulacji (funkcja „SPY”). Znaczy to, że program jest wykonywany z możliwością przerwania symulacji w dowolnej chwili i obserwacji, co dzieje się ze zmiennymi i poszczególnymi wartościami podczas takiego interaktywnego zatrzymania oraz modyfikacji niektórych wielkości. Działanie interaktywne programu jest przeciwieństwem pracy w tzw. trybie „batch mode”, kiedy to wszelkie zmiany i obserwacja wyników mogą nastąpić dopiero po zakończeniu całej symulacji. Natomiast NETOMAC posiada wbudowane procedury interpolacji, możliwość obliczeń stabilnościowych i zmianę długości kroku czasowego podczas symulacji. Stały krok czasowy symulacji, występujący w ATP, może wywołać błędy w obliczeniach, np. w czasie przełączania zaworów mostka tyrysto-

rowego WNPS, i może być przyczyną oscylacji numerycznych. Powstają także niepożądane czasy opóźnienia między rozwiązaniem równania sieci i równania sterowania. Te opóźnienia są eliminowane w programie NETOMAC właśnie przez użycie procedury interpolacji.



Rys. 7. Model układu WNPS używany podczas badań porównawczych ATP i NETOMAC

Fig. 7. HVDC system model used during comparison of investigation of ATP and NETOMAC

Badania porównawcze programów ATP i NETOMAC prowadzono na bazie modelu sieci prądu stałego przedstawionego na rysunku 7 [7]. Systemy prądu przemiennego, połączone linią WNPS, pracują przy częstotliwości 50 Hz i są systemami silnymi, to znaczy ich współczynnik zwarcia, definiowany jako  $SCR = S_k / P_d$ , gdzie  $S_k$  jest mocą zwarcia, zaś  $P_d$  - mocą przesyłaną, wynosi  $SCR = 5,0$ . Każdy przekształtnik wyposażony został w układ do kompensacji mocy biernej przekształtnika w postaci 2 filtrów. Linia WNPS łącząca oba systemy prądu przemiennego została zamodelowana jako monopólna o napięciu 400 kV i zdolności przesyłowej 600 MW. Linia ta jest linią mieszaną, tzn. składa się z dwóch sekcji napowietrznych, pomiędzy którymi jest włączony kabel podmorski. Wszystkie sekcje są zamodelowane jako łańcuch czwórników typu T. Dodatkowo linia WNPS jest wyposażona w filtry przeciwzakłócenia, identyczne w każdej stacji przekształtnikowej.

Przedstawiona na rysunku sieć została zamodelowana w obu programach. Niestety, tworzenie identycznego modelu w ATP i NETOMACu było możliwe jedynie dopóty, dopóki modelowano tylko elementy liniowe. Przy modelowaniu elementów nieliniowych, np. łączników, transformatorów, dla których przyjęto charakterystykę nieliniową, konieczne było wprowadzenie pewnych różnic w modelach.

Problemem jest również dokładna synchronizacja czasu działania łącznika (zaworu) w obu programach. Jeżeli założymy, że łącznik (zawór) ma się otworzyć dokładnie w chwili przejścia prądu przez zero, to uzyskanie takiego działania w NETOMACu jest dość proste ze względu na możliwość odpowiedniej interpolacji czasu otwarcia łącznika. W ATP jest wy-



magana eliminacja błędu wyznaczania czasu otwarcia łącznika przez dokładne testowanie procedury i korygowanie czasu łączeniowego oraz wprowadzanie po każdym teście korekt do procedury regulacji.

W przypadku transformatorów lub innych tego typu nieliniowych elementów (np. dławików z rdzeniem ferromagnetycznym) musi być zapewniona odpowiednia wstępna obróbka danych wejściowych dla obu programów. Proces ten jest ułatwiony w ATP dzięki licznym programom pomocniczym. W NETOMACu takich nakładek nie ma, dlatego proces ten może być nieco kłopotliwy. Ważna jest tu dokładność, gdyż nawet pojedyncza dana, poprawnie przetworzona, lecz zawierająca niewielki błąd, może być przyczyną ewidentnych różnic w obliczeniach. Na przykład, w ATP, jeżeli charakterystyka rdzenia transformatora jest odcinkowo-liniowa, może wystąpić, na skutek stałego istnienia kroku czasowego, nieznaczny błąd odczytu wynikły z „pominięcia” punktu nieciągłości. Rozbieżność ta jest jednak tym mniejsza, im mniejszy jest krok czasowy. Natomiast w NETOMACu rozbieżność ta nie wystąpi (interpolacja).

Z powyższych względów trudno jest uzyskać identyczną reprezentację i funkcjonowanie np. tyrystorów czy regulatorów w obu programach, chociaż symulacja regulacji bazuje na tych samych funkcjach.

W przypadku wykorzystania takich programów jak ATP i starsze wersje NETOMACa do obliczeń stanów przejściowych w systemach mieszanych prąd stały–prąd przemienny mały krok czasowy wymagał, by modelowanie mostka tyrystorowego ograniczało generalnie czas symulacji tego mostka do kilku sekund. Obliczenia stabilnościowe systemu prądu stałego były przez to opuszczane przez program stabilnościowy, w którym system prądu stałego był maksymalnie uproszczony, a cała sieć prądu stałego była reprezentowana jako funkcja przejścia (transmitancja).

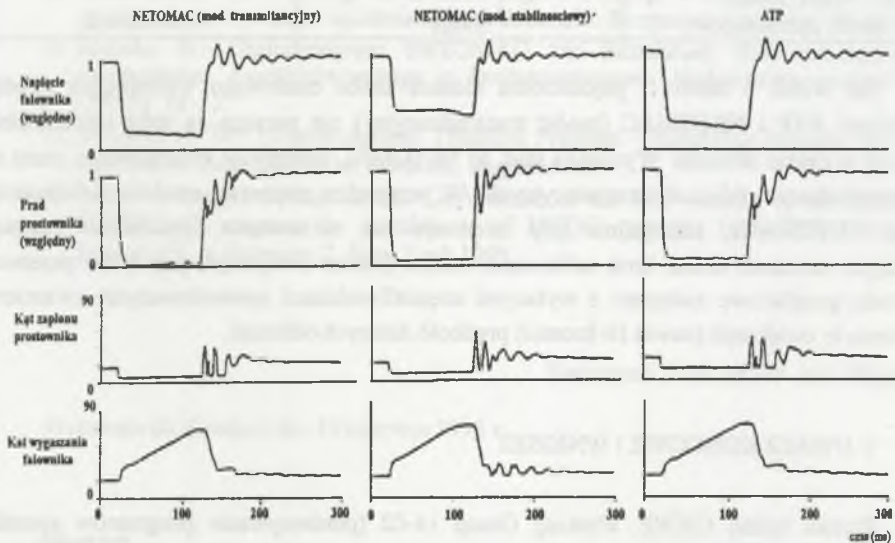
Modelowanie pozostaje jednak bardzo trudne i ograniczone w systemie ze złożonymi prądami stałymi, w szczególności wtedy, gdy badane są efekty zwarć lub ewentualnych przełączeń w liniach prądu stałego. Te badania przeprowadzono w nowej wersji NETOMACa, która oblicza jednocześnie część zmiennoprądową systemu, stosując program stabilnościowy, i część stałoprądową, stosując program do obliczeń przejściowych (transmitancyjnych). Model hybrydowy reprezentuje sieć prądu przemiennego jako pojedynczy, liniowy układ korzystający z zespolonych admitancji jako standardu do obliczeń stabilnościowych, ale jednocześnie rozwiązuje także równania różniczkowe reprezentujące obwód prądu stałego. Ponieważ obwód prądu stałego jest reprezentowany jako standardowy model przejściowy, wszystkie opcje normalnie używane w symulacjach przejściowych mogą być używane w obliczeniach na tym modelu. Wykorzystano to przy symulacjach różnych typów zwarć, w modelowaniu filtrów prądu stałego itp. Generatory są oczywiście modelowane z użyciem równań różniczkowych w zakresie symulacji ich odpowiedzi dynamicznych.

Połączeniem strony prądu przemiennego i stałego jest przekształtnik, który jest modelowany z użyciem równań quasi-stacjonarnych, z dodatkową logiką do odwzorowywania

warunków zwarciovych. Układ sterowania przekształtnika wymaga takich samych danych wejściowych (regulacyjnych) jak używane w części obliczeń przejściowych (transmitancyjnych), w związku z tym część danych wprowadzanych przy okazji tworzenia modelu stabilnościowego może być kopiowana do modelu transmitancyjnego. Nie można jednak odwzorować w ten sposób gałęzi jednofazowych mostków tyrystorowych i transformatorów, które są opisywane równaniami quasi-stacjonarnymi.

Model stabilnościowy NETOMACa pozwala na symulację różnych rodzajów zwarć w liniach prądu stałego (albo sytuacji łączeniowych), jak również symetrycznych zjawisk zachodzących w sieci prądu przemiennego. Zwarcia niesymetryczne mogą być jedynie aproksymowane przez model. Model stabilnościowy nadaje się więc najbardziej do wykrycia, który przypadek zwarcia w systemie WNPS jest krytyczny i powinien być dokładnie zbadany przy użyciu modelu transmitancyjnego. Model ten nadaje się też dobrze do sprawdzania zabezpieczeń WNPS.

Jak już wspomniano wcześniej, do analizy porównawczej wybrano sieć WNPS przedstawioną na rys. 7, przy czym do symulacji użyto modelu stabilnościowego i transmitancyjnego NETOMACa oraz modelu w ATP. Na rys. 8 pokazano przykładowo przebiegi napięcia falownika, prądu prostownika, kąta zapłonu prostownika i kąta wygaszania falownika, podczas zwarcia 3-fazowego w prostowniku i w falowniku. Jak widać na rysunkach, istnieje



Rys. 8. Przykładowe przebiegi uzyskane w wyniku przeprowadzenia symulacji zwarcia trójfazowego w prostowniku próbnego układu WNPS

Fig. 8. Examples of simulation results - simulation of 3-phase rectifier fault in HVDC system

prawie idealna zgodność pomiędzy modelem transmitancyjnym NETOMAC i modelem w ATP. Natomiast między modelem stabilnościowym NETOMAC a powyższymi modelami istnieje pewna niewielka rozbieżność, co świadczy o tym, że model stabilnościowy NETOMAC jest nieco mniej dokładny niż dwa pozostałe. W tabeli 1 pokazano natomiast czasy obliczeń i przyjęty przez poszczególne programy krok czasowy całkowania. Krok czasowy został zresztą wybrany metodą kolejnych testów i był, począwszy od najmniejszej wartości, powiększany w kolejnych próbach aż do momentu, kiedy dokładność uzyskiwanych wyników zaczynała się obniżać. W przypadku ATP następowało to, gdy długość kroku czasowego wynosiła ok. 20  $\mu\text{s}$ , w przypadku NETOMACa, wykorzystującego techniki interpolacji – dopiero przy 100 $\mu\text{s}$ . Jeśli chodzi o model stabilnościowy NETOMACa, to przyjęto wspólny krok czasowy do obliczeń stabilnościowych w systemie prądu przemiennego i do obliczeń przejść dynamicznych w części prądu stałego.

Tabela 1

Porównanie kroków czasowych i czasu obliczeń dla symulacji przeprowadzonych na modelu z rysunku 7

Program i model systemu	Wielkość kroku czasowego	Czas obliczeń
ATP (wersja 6)	20 $\mu\text{s}$	765 sekund
NETOMAC Model transmitancyjny	100 $\mu\text{s}$	193 sekundy
NETOMAC Model stabilnościowy	500 $\mu\text{s}$	21 sekund

Jak widać z tabeli 1, pięciokrotna różnica kroku czasowego występująca między modelami ATP i NETOMAC (model transmitancyjny) nie pociąga za sobą pięciokrotnej różnicy w czasie obliczeń. Wynika to stąd, że NETOMAC potrzebuje dodatkowego czasu na przeprowadzenie obliczeń interpolacyjnych. W przypadku natomiast modelu stabilnościowego NETOMACa, szczególnie gdy interesuje nas zachowanie dynamiczne systemu w długich okresach czasu, krok całkowania można jeszcze zwiększyć, gdy tylko przeminą zjawiska przejściowe związane z wyższymi częstotliwościami spowodowanymi zwarciem. Powinno to zwiększyć (nawet 10-krotnie) prędkość dalszych obliczeń.

## 5. UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

Wyniki badań CIGRE Working Group 14-02 (porównywanie programów symulacyjnych z symulatorem analogowym sieci) udowodniły, że nowoczesny, elastyczny program symulacyjny może powtórzyć wyniki uzyskane z symulatora analogowego z dużą dokładnością. Takimi nowoczesnymi programami są zarówno NETOMAC, jak i ATP. Co więcej, badania porównawcze ATP i NETOMACa wykazały, że za pomocą tych dwu programów można osiągnąć wyniki różniące się tylko nieznacznie, z tym że ze względu na brak



interpolacji krok czasowy w ATP przy obliczeniach musi być ok. 5 razy mniejszy niż w NETOMACu. Oba programy są więc przydatne do symulacji układów WNPS. Czas symulacji pokazuje, że badania układów WNPS oraz oddziaływań WNPS-WNPP powinny być przeprowadzone w trzech etapach: stworzenie modelu i przeprowadzenie symulacji w części stabilnościowej NETOMACa (z ewentualną korektą danych wejściowych), obliczenia dokładne przy użyciu modułu obliczeń przejściowych (transmitancyjnych) NETOMACa, a następnie sprawdzenie obliczeń za pomocą programu ATP. Oczywiście można też wykorzystać program ATP jako podstawowy, a NETOMAC jako kontrolny. W warunkach energetyki polskiej możliwość kontroli przez jeden z programów wyników symulacji przeprowadzonej w innym programie jest tym cenniejsza, że nie dysponujemy odpowiednim symulatorem analogowym sieci prądu stałego.

## LITERATURA

1. Brocick S., Kula M.: Współpraca KSE z układem przesyłowym prądu stałego w relacji Wschód-Zachód. Materiały Międzynarodowego Sympozjum „Przesył prądem stałym przez obszary zurbanizowane”, Warszawa-Jadwisin 24-26.03.1993.
2. Kordus A., Plenzler G.: Przesył energii prądem stałym. „Automatyka Elektroenergetyczna” 1/95, s.12-14.
3. Budziński P. A.: Przebiegi nieustalone prądów i napięć w stacjach wysokiego napięcia prądu stałego wywołane łączeniami i zakłóceniami. Rozprawa doktorska, Warszawa 1997.
4. Kulicke B.: Digitalprogram NETOMAC zur Simulation elektromechanischer und magnetischer Ausgleichvorgänge in Drehstromnetzen. „Elektrizitätswirtschaft”, Heft 1 1979, s. 18-23.
5. Dommel H. W.: Electromagnetic Transient Program – Reference Manual, vol. 2, Bonneville Power Administration, Portland, August 1986.
6. Lehn P., Rittiger J., Kulicke B.: Comparison of the ATP version of the EMTP and the NETOMAC program for simulations of HVDC systems. 1995 PES Wintermeeting, January 29, to February 2, New York 1995.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Ciok

Wpłynęło do Redakcji dn. 15 czerwca 1998 r.

## Abstract

The possibility of dynamic modelling of high voltage DC transmission lines by means of the ATP and NETOMAC programs is discussed in the paper. In the first chapter the necessity of investigations concerned with implementation of such systems in Poland is shown. Second chapter describes the existing HVDC systems with advantages and disadvantages of each of them. In the third chapter two programming tools - ATP and

NETOMAC used for simulation of transient in power systems are presented. The specific features of both programs - for example frequency division in NETOMAC into two ranges with various dynamic models, variable calculation step and interpolation procedures or in ATP - „history forms” of the system, differential equation numerical solution by means of difference equation, constant time step, etc. are given.

In Chapter 4 the simulation results of ATP and NETOMAC are compared. The monopolar 400 kV system has been modelled, composing two overhead transmission lines and one section of submarine cable. The HVDC transmission system connects two AC systems, which are characterised by the fault factor  $SCR=5.0$ . Both converter stations are equipped with the VAR compensators and disturbance filters which are also equipped in the HVDC line. The differences of the modelling in the both programs are also discussed. The results of the 3-phase rectifier fault of the HVDC are compared. The NETOMAC simulations have been performed twice - with advanced stability model and transient model. The comparison studies have shown that the shortest computation time is achieved by the advanced stability model of NETOMAC.

It has been confirmed that for the applied in Poland HVDC systems the most optimal way of modelling would be to use NETOMAC first and next to verify the results with ATP simulation.