



Robert Ziemba*

MODELOWANIE NARAŻEŃ IZOLACJI KABLI ELEKTROENERGETYCZNYCH ZA POMOCĄ PROGRAMU EMTP-ATP

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę możliwości wykorzystania programu EMTP-ATP do oceny narażeń izolacji kabli elektroenergetycznych. Program ten zawiera procedurę CABLE CONSTANTS przeznaczoną do obliczania parametrów elektrycznych kabli elektroenergetycznych. Obliczenia tych parametrów wykonywane są na podstawie wymiarów geometrycznych oraz właściwości fizycznych kabli i otaczającego je środowiska. Parametry te mogą być użyte do symulacji przepięć i przetężeń w analizowanym układzie kabli elektroenergetycznych.

Słowa kluczowe: program EMTP-ATP, izolacja kabli elektroenergetycznych, modelowanie matematyczne

1. Wstęp

Program ATP (Alternative Transients Program) jako wersja programu EMTP (ElectroMagnetic Transients Program) jest szeroko stosowanym pakietem służącym do symulacji zjawisk przejściowych w układach elektroenergetycznych. Typowa praca programu to badanie układu elektroenergetycznego w dziedzinie częstotliwości lub w warunkach stanu przejściowego. Podstawowym zadaniem programu jest symulacja stanów nieustalonych w układach elektroenergetycznych. Mogą to być przepięcia i przetężenia łączeniowe, przebiegi przejściowe wywołane wyładowaniami atmosferycznymi, przejściowe napięcia powrotne itp. Program jest wówczas wykorzystywany do rozwiązywania układu równań opisujących obwód złożony z opisanych elementów. Analiza stanu ustalonego może być przeprowadzona dla dowolnej częstotliwości z przedziału od 0,001 Hz do 500 kHz (1 MHz) [1].

* Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

Program ATP zawiera duże możliwości modelowania elementów systemu elektroenergetycznego oraz dobrze dopracowane obliczanie stanów przejściowych.

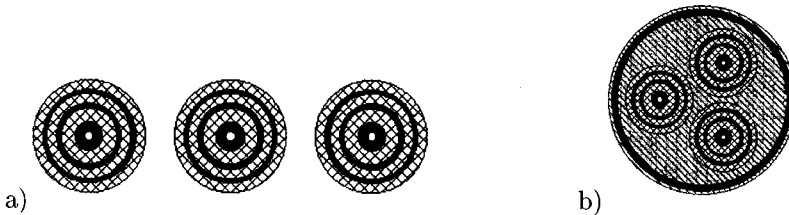
Elementami układu elektroenergetycznego mogą być [2]:

- Skupione rezystancje liniowe i nieliniowe, rezystancje zmieniające się w czasie.
- Skupione cewki liniowe i nieliniowe, przy czym nieliniowe charakterystyki rdzenia ferromagnetycznego mogą być zarówno funkcjami jednowartościowymi $B(H)$ ($\mu(i)$), jak i pętlą histerezy z namagnesowaniem resztkowym.
- Skupione kondensatory.
- Wielofazowe struktury typu II opisane symetrycznymi macierzami kwadratowymi $[R]$, $[L]$ i $[C]$, uwzględniającymi sprzężenia indukcyjne i pojemnościowe między poszczególnymi fazami.
- Wielofazowe linie przesyłowe o parametrach rozłożonych, przy czym możliwa jest reprezentacja zarówno parametrami niezależnymi od częstotliwości, jak i charakterystykami częstotliwościowymi parametrów jednostkowych.
- Źródła napięcia i prądu opisane typowymi funkcjami matematycznymi dostępnymi w programie (stałe, z liniowo narastającym zboczem, piłokształtne, sinusoidalne, udarowe itp.) oraz przygotowane przez użytkownika punkt po punkcie funkcje czasu, podprogramy w Fortranie lub bloki TACS.
- Łączniki używane do modelowania wyłączników, przerw iskrowych i wszelkich zmian połączeń w układzie (należą tu również diody, tyrystory i triaki modelowane jako idealne klucze).
- Transformatory jednofazowe i trójfazowe (dwi- i trójzwojeniowe).
- Odgromniki ZNO opisane potęgową zależnością prądowo-napięciową.
- Maszyny elektryczne wirujące — przede wszystkim maszyna synchroniczna, której modelowanie jest najbardziej rozbudowane, ale także maszyny indukcyjne i maszyny prądu stałego. Modele maszyn mogą być podłączone do bloków TACS, co pozwala na dynamiczne regulowanie napięcia i obrotów.
- Segment TACS (Transient Analysis of Control Systems), który jest cyfrowym symulatorem maszyny analogowej. Z bloków TACS można realizować dynamiczne układy sterowania — wejścia i wyjścia tych bloków można łączyć z układami pozostałych elementów modelowanych w programie. Maszyny hybrydowe mają możliwości różnorodnego zastosowania. Wszystkie konfiguracje TACS są wstawkami użytkownika do programu, mają więc duże możliwości modelowania — dopuszczalne są na przykład operacje nieliniowe i logiczne różnych typów.

Obszar zastosowań pakietu jest ciągle poszerzany, czego przykładem może być symulacja mikroprocesorowego sterowania kompensatorem mocy biernej czy badanie stanów nieustalonych uziomów. W analizach porównawczych z innymi pakietami ocena programu EMTP-ATP zależy od konkretnej sytuacji, w której jest wykorzystywany. W obszernych badaniach nad symulacją komputerową systemów przekształtnikowych program otrzymał na przykład szereg ocen niższych niż specjalistyczne programy dla układów energoelektroniki jednak z ocen dla poszczególnych kryteriów trudno zbudować ocenę wypadkową i dlatego program EMTP-ATP nawet w tym nietypowym dla niego obszarze pozostaje narzędziem użytecznym.

2. Modelowanie kabli elektroenergetycznych

W programie EMTP-ATP modele kabli elektroenergetycznych są silnie związane z modelami linii napowietrznych. Cechą szczególną tych modeli jest uwzględnianie w nich obwodu ziemnopowrotnego. Linie kablowe mogą być modelowane jako podziemne lub napowietrzne.



Rys. 1. Przykłady kabli modelowanych w programie EMTP-ATP: a) układ kabli jednożyłowych, b) kabel trójżyłowy

Na podstawie danych fizycznych i geometrycznych, procedura CABLE CONSTANTS oblicza parametry elektryczne kabli odpowiadających jednej z klas:

- klasa A** – układ jednożyłowych współosiowych kabli bez osłony metalowej (rys. 1a.) umieszczonych pod ziemią lub nad jej powierzchnią.
- klasa B** – kabel jednożyłowy lub wielożyłowy z osłoną metalową (rys. 1b.), umieszczony pod ziemią lub nad jej powierzchnią.
- klasa C** – układ konwencjonalnej napowietrznej linii przesyłowej

Klasy te nie obejmują wszystkich stosowanych układów kabli i należy wybierać klasę najbardziej zbliżoną do danego układu, podając odpowiednio jego dane geometryczne i fizyczne.

Dla przedstawionych wyżej klas można za pomocą procedury CABLE CONSTANTS wyliczyć następujące parametry elektryczne:

- macierze parametrów $[R]$, $[L]$, $[C]$, $[Z_c]$ i macierze transformacji $[T_v]$, $[T_i]$ dla stanu ustalonego,
- parametry zastępczej kaskady czwórników typu II do obliczeń stanu ustalonego i stanów przejściowych,
- parametry modelu fal biegnących z użyciem zależności parametrów kabli od częstotliwości.

Parametry te można obliczać dla pojedynczej częstotliwości lub dla dowolnego zakresu częstotliwości w skali logarytmicznej. Dla kabli podziemnych może być wykorzystany jednorodny model ziemi (model Carsona) natomiast dla kabli i linii napowietrznych można wykorzystać dodatkowo trzywarstwowy model Nakagawy.

Poprzez dołączenie wyliczonych parametrów do pliku danych zawierających pozostałe elementy badanego układu elektroenergetycznego (źródła, linie napowietrzne, transformatory, odgromniki itd.) można poprzez obserwację przebiegów czasowych napięć i prądów ocenić zagrożenie jakie może się pojawić na izolacji kabla od przepięć (natężenie pola elektrycznego) i przetężeń (naprężenia termiczne i mechaniczne).

Podstawy modelowania matematycznego kabli elektroenergetycznych w programie EMTP-ATP pochodzą z pracy Wedephola i Wilcoxa [3], którzy wykazali przede wszystkim, że w trójfazowym układzie kabli jednożyłowych parametry dla modów propagacji, tzn. prędkość propagacji, tłumienie i impedancja falowa, zależą od częstotliwości znacznie silniej niż dla linii napowietrznych. Pracę [3] i inne następujące po niej, na przykład prace Browna i Rocamory [4, 5], Bianchi i Luoni [6] czy Ametaniego [7] opracował w formie modeli matematycznych kabli wielofazowych do programu EMTP-ATP L. Marti w swojej pracy doktorskiej z 1986 r. [8]. Wykazał na przykład, że elementy macierzy transformacji $[T_i]$ zależą dla wielofazowych linii kablowych od częstotliwości do kilku kHz i przyjmowana we wcześniejszych pracach niezależność tych elementów od częstotliwości może być utrzymana tylko dla przebiegów wysokoczęstotliwościowych, na przykład przebiegów wywołanych wyładowaniami atmosferycznymi.

Wprowadzenie zależności parametrów linii kablowych od częstotliwości i konieczność prowadzenia symulacji przepięć i przetężeń w dziedzinie czasu ze względu na obecność w układzie elementów nieliniowych takich jak odgromniki zaworowe, ochronniki tlenkowe na bazie ZnO czy elementy stalowe opisane pętlą histerezy wymaga stosowania efektywnych procedur numerycznych liczenia całek spłotowych. W programie EMTP-ATP problemy te rozwiązano zadowalająco, co pozwala na wykonywanie symulacji przebiegów przejściowych w stosunkowo złożonych układach z liniami kablowymi na powszechnie dostępnych mikrokomputerach klasy PC.

Warto zwrócić uwagę, że w programie EMTP-ATP przygotowano specjalistyczne rozwiązania, pozwalające na proste modelowanie układów kabli ze skrzyżowanymi powłokami. Krzyżowanie powłok w trójfazowych układach kabli jednożyłowych stosuje się jak wiadomo w celu zmniejszenia strat mocy w powłokach. Odcinek linii kablowej dzieli się wówczas na trzy podsekcje połączone w ten sposób, że suma napięć indukowanych w połączonych wzajemnie odcinkach powłok jest równa zeru. W dłuższych liniach oprócz krzyżowania powłok stosuje się również przeplatanie żył. Krzyżowanie powłok zmniejsza straty mocy w powłokach w warunkach pracy znamionowej, przy przebiegach przepięciowych prowadzi jednakże do przepięć znacznie większych niż w układach bez krzyżowania. Program EMTP-ATP pozwala na przeprowadzenie symulacji przebiegów przepięciowych w układzie podstawowym bez ochrony przed przepięciami, jak również po wprowadzeniu elementów typu odgromniki zaworowe czy ochronniki ZnO zarówno na końcach linii jak i na połączeniach krzyżujących. Wyniki symulacji komputerowych z programu EMTP-ATP uzyskały dla układów kabli ze skrzyżowanymi powłokami zadowalające potwierdzenie w badaniach eksperymentalnych.

3. Środowisko pracy programu EMTP-ATP

Zasady pracy z programem obejmują przygotowanie plików z danymi wejściowymi oraz obsługę wyników przetwarzania. Na wyjściu programu otrzymuje się wybrane zmienne (napięcia węzłów, napięcia na elementach, prądy gałęzi, momenty obrotowe maszyn, prędkości maszyn itp.) w zadanych momentach. Możliwe jest zestawienie licz-

bowe wyników i wykonanie wykresów badanych wielkości w funkcji czasu. Ze względu na szeroki zakres możliwości modelowania i analizy elementów układu elektroenergetycznego, oraz rygorystyczny sposób przygotowywania plików wsadowych do obliczeń, obsługa programu jest dość trudna dla początkujących użytkowników. Dlatego preprocesory i postprocesory graficzne są w ostatnich latach jednym z najintensywniej rozwijanych elementów programu. W grupie preprocesorów na uwagę zasługuje program ATPDRAW, który po powstaniu kilku kolejnych wersji pracujących pod DOSem (sukcesywnie poprawianych i uzupełnianych), od niedawna jest dostępny w wersji dla środowiska Windows, pozwalającej na wprowadzanie większości elementów dostępnych w programie EMTP-ATP i bardziej przyjaznej dla użytkownika. Preprocesor ten pozwala na przygotowanie danych wejściowych do obliczeń poprzez narysowanie analizowanego układu elektroenergetycznego, podanie odpowiednich danych użytych elementów i parametrów symulacji, a następnie wygenerowanie pliku wsadowego gotowego do obliczeń w programie EMTP-ATP.

Jako dodatek do tej wersji ATPDRAW został stworzony program ATP_LCC (Line/Cable Constants), za pomocą którego w łatwy sposób można przygotować pliki wsadowe do wyliczenia parametrów elektrycznych kabli i linii napowietrznych. Po wprowadzeniu danych geometrycznych i fizycznych danego elementu (kabla lub linii napowietrznej) preprocesor ten udostępnia opcję graficznej prezentacji przekroju poprzecznego wprowadzonego układu (rys. 1).

4. Podsumowanie

Obecnie program EMTP-ATP wraz z preprocesorami ATPDRAW i ATP_LCC pod Windows oraz postprocesorami TPLOT/PCPLOT jest bardzo mocnym obliczeniowo i przyjaznym w użyciu pakietem do analizy czasowej stanów ustalonych i przejściowych w układach elektroenergetycznych.

Sam program EMTP-ATP jest ciągle rozszerzany i uzupełniany o nowe modele elementów i algorytmy obliczeniowe. Organizowane przez EEUG kursy szkoleniowe i spotkania członków stowarzyszenia, publikowane biuletyny „EEUG News” i „Can/Am EMTP News” (Kanadyjsko Amerykańskiej Grupy Użytkowników) jak również swobodny dostęp do grupy dyskusyjnej użytkowników programu w sieci Internet dają bardzo szerokie możliwości zapoznawania się z najnowszymi metodami analizy i sposobami modelowania układów elektroenergetycznych. Przykładowo w listopadzie 1997 r. odbędzie się w Barcelonie kolejne spotkanie użytkowników programu oraz kurs z zakresu wykorzystania programu do badania przepięć oraz koordynacji izolacji.

Literatura

- [1] *Alternative Transients Program, Rule Book*. t. 1-4 Leuven EMTP Center 1986
- [2] **Dommel H. W.**: *ElectroMagnetic Transients Program, Reference Manual (EMTP Theory Book)*. Portland Oregon 1986

- [3] **Wedephol L. M., Wilcox D. J.:** *Transient analysis of underground power transmission systems; system model and wave propagation characteristics.* Proc. IEE, vol. 120, pp. 252-259, Feb. 1973
- [4] **Brown G. W., Rocamora R. G.:** *Surge propagation in three-phase pipe-type cables. Part I — Unsaturated pipe.* IEEE Transactions on Power, Apparatus and Systems, vol. PAS-95, pp. 89-95, Jan./Feb. 1976
- [5] **Rocamora R. G., Brown G. W.:** *Surge propagation in three-phase pipe-type cables. Part II — Duplication of field tests including the effects of neutral wires and pipe saturation.* IEEE Transactions on Power, Apparatus and Systems, vol. PAS-96, pp. 826-833, May/June 1977
- [6] **Bianchi G., Luoni G.:** *Induced currents and losses in single-core submarine cables.* IEEE Transactions on Power, Apparatus and Systems, vol. PAS-95, pp. 49-58, Jan./Feb. 1976
- [7] **Ametani A.:** *A general formulation of impedance and admittance of cables.* IEEE Transactions on Power, Apparatus and Systems, vol. PAS-99, pp. 902-910, May/June 1980
- [8] **Marti L.:** *Simulation of electromagnetic transients in underground cables with frequency-dependent modal transformation matrices.* Ph.D. thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada, Nov. 1986

MODELLING OF POWER CABLE INSULATION RISK IN EMTP-ATP PROGRAM

ATP (Alternative Transients Program) as a version of EMTP (ElectroMagnetic Transients Program) is an universal program for digital simulation of transients of electromagnetic as well as electromechanical nature. With this digital program, complex power systems and control systems of arbitrary structure can be simulated. In the paper the possibilities of power cable insulation risk analysis in this program are presented. The basic mathematical models of cables in EMTP-ATP are characterized and digital simulations of overvoltages are described.