

Симулатор на преобразователни схеми
(тензорен подход)
Ив. Цеков, В. Борисов, И.Булиев, Е. Димитрова
Технически университет - Варна

При цялото многообразие, свързано с елементна база, предназначение, мощност и пр. силовите преобразователи се характеризират с общ принцип на работа - електронните прибори управляват циркулацията на енергията, без съществено да участват при формиране на енергийния баланс. Способността на вентилите да "преконфигурират" веригата предопределя основните свойства на този клас схеми. С оглед на тези трудно оспорими факти би било методологически правилно да се разграничат понятията "състояние на вентила" и "състояние на схемата". В първия случай трябва да се подразбира състояние (стойности) на параметрите на вентила. Промяната в "състоянието на схемата", от друга страна, следва да се тълкува като промяна в хода (посоката, динамиката) на енергийния обмен. Това разграничение е особено важно в контекста на задачата за симулативно изследване на процесите в силовите преобразователи. Съдържанието на тази задача се определя от принципа на работа, базиран върху елементи със съществено нелинейно в електрически смисъл поведение.

Сложността на тази задача се заключава в следните два въпроса:

- как да моделираме поведението на приборите, т.е. промените в "състоянието на вентила"
- как да съставим и решим описанието на обект, съдържащ такива елементи, т.е. да отразим промените в "състоянието на схемата"

1. Модели на силови електронни прибори - прилаганите в изследователската практика решения покриват целия диапазон между класическите алтернативи :

- * нелинейни - поинтервално линейни
- * нестационарни - стационарни
- * инерционни - безинерционни
- * физически - функционални (формални)

Въпреки значителното разнообразие от възможности се очертават два основни подхода за

2. Съставяне и решаване описанието на веригата

* нелинейна динамична система уравнения, формирана еднократно в съответствие със законите на Кирхоф - в изчислителен план тя може да бъде сведена до :

- нелинейна алгебрична система
- линеаризирана система диференциални уравнения

Независимо от избора на изчислителен способ общата характеристика на този подход е следната: лесно съставимо описание, итеративно решаване, богати на детайли резултати, за чието получаване се консумира съществена част от изчислителното време. Във връзка с последното ще подчертаем, че детайлите сравнително рядко биват цел на изследователя на силови преобразователи. Освен това описаният тип резултати следва да се анализира със скептицизъм, съществено превишаващ необходимия при тълкуване на енергообменните процеси.

* поинтервално линейна, динамична, нестационарна система - ако системата е съставена, решаването може да се счита за тривиална задача. Проблемът произтича от изменчивостта на описанието, дължаща се на :

- изменчивост на параметрите при фиксирана топология
- смяна на топологията при идеални ключове

В изследователската практика се използват програмни системи, реализиращи и двата подхода [1]. Това е обяснимо с оглед разнообразието на решаваните задачи, но направената съпоставка дава основание да предпочетем като методологическа основа втория подход. Което изисква анализиране възможностите на класическите методи (контурен и възлов) за описване на процеси във вериги с променлива топология. Ако се ограничим в рамките на една от тези хомогенни координатни системи, то неизбежно е формулирането на правила за периодична смяна на независимите променливи (координатите). Към това препятствие следва да добавим и някои специфични за класическия възлов анализ недостатъци, произтичащи от абсолютизацията на понятието "възел" - например необходимостта от изкуствено въвеждане на общ за две галванически несвързани системи базов възел. Друг негативен факт е несъответствието между еднородната (токова или напреженова) координатна система и схващането, че се решава задача за проследяване посоката и динамиката на енергийния обмен.

Изброените факти водят към следното заключение: необходими са координатна система и съпътстващ математически апарат, позволяващи лесна интерпретация на събитията във верига с двойствено поведение (частично известни токове, частично известни напрежения) на някои елементи. Считаме, че такъв апарат предоставя Тензорният анализ на Габриел Крон [2]. Върху него са изградени основните алгоритми на Симулатора на преобразувателни схеми (СПС), чиито функционални особености и начин на употреба са обект на настоящата работа. С цел внасяне на минимално нужната яснота тук ще изложим някои основни понятия и тези, формулирани в [2]:

- замяна на термина "възел" с "възлова двойка"

- тензор на преобразуване - нека p на брой клони, съдържащи последователно свързани импеданс и източник на напрежение са свързани по произволен начин. Така формираната верига е описана например в контурна координатна система, като са известни стойностите на координатите. Ако веригата се опише в друга координатна система, то връзката между старите и новите координати се задава с "матрица на преобразуване" C_{mn} . Съвкупността от всички матрици, описващи трансформацията на координатите при преход от една към произволна друга система формира тензора на преобразуване. Необходимо е да се подчертае, че преминаването от една към друга координатна система в рамките на една и съща структура се разглежда като частен случай на трансформиране на самата структура. В този смисъл изучаването на всички структури, които биха могли да се образуват от описаните p клони се свежда до изучаване на една частна структура и формиране на тензор на преобразуване.

- ортогонална верига - в хомогенна координатна система верига, състояща се от p клони може да бъде описана чрез k на брой контури, като за известни се считат обикновено приложените контурни

напряжения e' , за неизвестни - токовете на контурите i' . Двете величини се свързват чрез импедансната матрица z' . В същото време тази верига съдържа и $n-k$ възлови двойки, от които могат да се отчетат $n-k$ напряжения E' . В добавка може да се счита, че към всяка възлова двойка са приложени токове I' с нулева стойност. От тези разсъждения е видно, че контурната верига може да се разглежда като ортогонална. За целта се записват n уравнения от вида

$$E'e = z'(i-n),$$

в които от общо $4n$ величини n могат да бъдат неизвестни. Например, ако по някаква причина напряжението на дадена възлова двойка E_i (отпушен идеален вентил) стане известно, то ще се появи неизвестен контурен ток i_i (ток на възникналия с отпушването на вентила контур). В СПС-този механизъм се прилага за оценка на процеса при текущата конфигурация и установяване на условията за смяна на "състоянието на вентила". Ортогоналното описание се трансформира до обобщена форма на променливите на състоянието, която позволява предварителна оценка на динамиката на собствените процеси и адаптиране на изчислителната стъпка. Пресмятането се извършва чрез преходна матрица, което елиминира проблема за устойчивостта на решението.

3. Симулатор на преобразователни схеми - структура и възможности

Учебната версия включва около 60 типови схеми, групирани в 12 раздела, както и допълнителен потребителски раздел. Не съществуват принципни затруднения за допълването на библиотеката с произволни схеми, съдържащи елементи от описаните по-долу класове.

3.1. Базовият набор на Симулатора включва :

- обобщен клон от последователно свързани E, R, C и L (включително и магнитносвързана) елементи. Поне един от тези елементи трябва да има ненулева стойност. Генераторът може да бъде синусоидален или постоянен.
- полупроводникови прибори (диоди, тиристори, транзистори). Полупроводниковите елементи са представени чрез заместваща схема, съставена от обемно съпротивление и последователно свързани: утечно съпротивление при изключен вентил или източник на противоед.н. (прагово напрежение) във включено състояние.

3.2. Диалогова система

СПС поддържа три основни и четири спомагателни режима, описани във входното меню :

Режим 1: Въвеждане на параметри на нова схема и симулация .Изборът на този режим изисква въвеждане на името, под което ще се записват резултатите.В хода на изследването се създават файлове с указаното име и разширение 1,2 и т.н. Във всеки от тях се разполагат данни за приблизително 25 временни точки. След като от библиотеката бъде избрана принципната схема, се активира модулет за въвеждане и корекция на параметри и определяне условията на анализа.

Режим 2: Продължение на предишна симулация - посочва се името на файловете с данни, за които чрез Режим 1 са въведени параметри и, евентуално, е изпълнена симулация. Отново се активира модулет за въвеждане и корекция на параметри. Той предлага следните възможности:

-> **Промяна на параметри на схемата** - въвеждане или корекция на характеристиките на обобщените клони, задаване моделните параметри вентилите

-> **Промяна на управление** - дефиниране на управляващите сигнали

-> **Оценка на собствените процеси** - пресмята собствените стойности на матрицата на състоянието за въведена от потребителя, или избрана от възникнали при симулация комбинация от състояния на вентилите

-> **Независими начални условия** - за променливите на състоянието

-> **Начално време на симулация** - позволява симулация от достигнатите начални условия и нулев начален момент

-> **Крайно време на симулация** - предлага на потребителя симулационен интервал, равен на един период на сигнала с най-ниска честота

-> **Максимална стъпка по време** - тъй като СПС подбира адаптивно стъпката на пресмятане, зададеното тук има само ограничителен характер. По подразбиране е 1/50 от периода.

-> **Минимална стъпка по време** - СПС не проследява детайлно собствени процеси, чиято продължителност е съизмерима с тази стъпка, ако, разбира се, тяхното развитие не предизвиква промяна в състоянието на вентилите. Подразбира се 1/10000 от периода.

-> **Име на файла за данни**

-> **Симулация до установен режим** - извършва многократна симулация за един период до достигане на установен режим (удовлетворително съвпадане на началните и крайните условия). Използва констатираната в хода на симулацията поредност и продължителност на междумутационните интервали за прогнозиране на установения режим.

-> **Параметрично изменение** - въвежда се стъпка и интервал на изменение на един или няколко параметъра на схемни компоненти. За посочения набор стойности се пресмятат процесите до установен режим и се извежда графична зависимост на избрани величини от зададените параметри.

-> **Контурно описание на схемата**

-> **Начало на симулация** - стартира изчислителния модул

Наред с основното си предназначение този модул извежда ограничена информация за хода на процесите :

- информация за момента, в който е възникнала текущата комбинация от състояния на вентилите (T_0), текущата стъпка ($step$), броя на файловете с данни и информация за текущото състояние на вентилите. Тази информация е дублирана с изображението на принципната електрическа схема, от която са отстранени запушените вентили

- информация за текущото симулационно време (T), времето изминало след този момент ($dT = T - T_0$), броя на временните точки от началото на симулацията и информация за възникнали условия за промяна в състоянието на вентила.

- информация за момента, в който е възникнала предходната комбинация от състояния на вентилите (T_{00}), времето изминало след този момент ($dT = T_0 - T_{00}$), информация за изчислителната ефективност на алгоритъма при зададените параметри на схемата и информация за вентилите, които са сменили състоянието си. При достигане на крайното време на симулация автоматично се активира графичният процесор.

Режим 3: Графичен процесор (Визуализация на данни).Освен визуализиране този режим извършва частична обработка на резултатите и извежда някои характеристични величини. Тъй като при продължителни симулации се натрупва значително количество файлове, е предвидена възможност за изборно зареждане на част от файловете с данни. Основното меню на процесора включва 8 режима:

-> **лупа за време** - освен детайлизираната осцилограма показва средна, ефективна и максимална стойност, както и възникналите в диапазона "състояния на схемата"

-> **състояния на схемата** - сортирани по продължителност

-> **хармоничен анализ** - има възможност за задаване на честоти, или номера на хармониците. Начинът на дискретизиране на процеса не влияе върху достоверността на резултата

-> **съхранение на данни** - запис на данните в текстов файл

-> **показва отново**

-> **нови величини** - от същите файлове с данни

-> **нови файлове с данни** - с изобразяване на същите величини

-> **P, Q, S** - активна, реактивна и пълна мощност в избрания интервал

Пълната версия на симулатора представлява интегрирана среда за развитие на преобразователни системи и устройства и включва следните допълнителни възможности:

- ускоряване на анализа чрез създаване на минимален математически модел (идеални вентили, линейни елементи и т.н)

- възможност за пренебрегване на намагнитващите токове, потоците на разсейване, или и двете едновременно (идеални трансформатори) в магнитно свързани вериги

- нелинейни явления в електромагнитните елементи

- пространствено разпределение на електромагнитните величини във високоволтови и високочестотни вериги

- диагностика на система при въздействието на случайни смущения, аварийни ситуации и режими и т.н.

- синтез на аналогови управляващи блокове (регулатори)

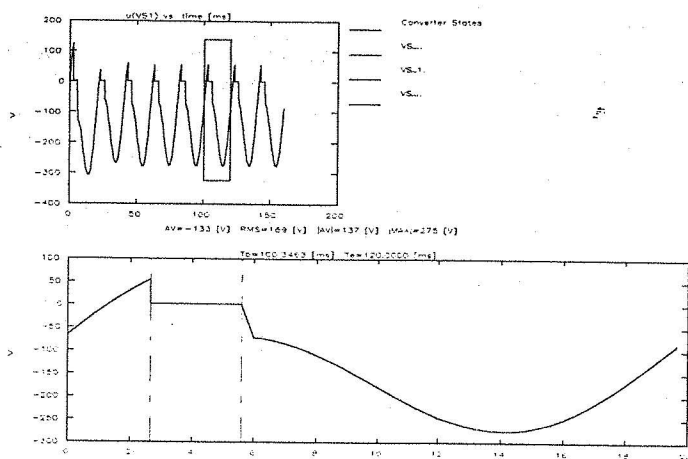
- синтез на дискретни (микропроцесорни) управляващи блокове (регулатори)

- оптимизиране параметрите на регулатора и режима

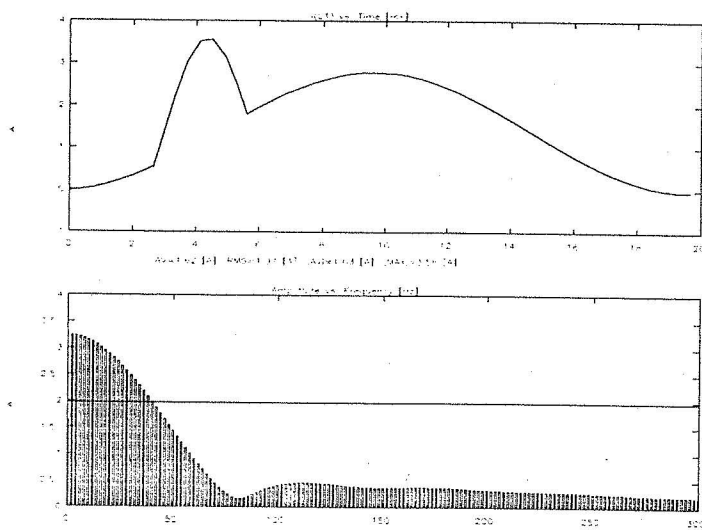
- тестване на реални микропроцесорни контролери върху симулиран обект

- създаване на математически модел в символна форма описващ поинтервално процесите в преобразователната схема

На фиг. 1,2 са илюстрирани някои от възможностите на СПС. Анализирана е типична схема на двуполупериоден управляем изправител със средна точка и Г-образен LC филтър. Поради значителната стойност на намагнитващия ток в преходен режим възниква значителна несиметрия в работата на изправителя. На фиг.1 е представена пълната времедиаграма на напрежението за един от тиристорите през първите 16 периода от развитието на процеса, както и изображение на същата величина за един период в режим 'Лупа' с оценка на средната, ефективната и максималната стойност. Втората графика представя времедиаграмата на първичния ток на трансформатора и резултата от хармоничния анализ.



фиг. 1



фиг. 2

Литература :

1. Борисов, Цеков, "Физическо и функционално моделиране на статични преобразуватели ", ЕТ'93, Созопол
2. Gabriel Kron, *Tensor Analysis of Networks*, NY, John Wiley and Sons, 1965