

ИЗСЛЕДВАНЕ НА НЕСИМЕТРИЧНИ И НЕЛИНЕЙНИ РЕЖИМИ В ТРИФАЗНИТЕ ЧЕТИРИПРОВОДНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ МРЕЖИ

Снежана Стоянова, Васил Агапиев, Младен Пройков

*Република България, 8000 Бургас, бул. „Проф. Яким Якимов“ №1, Университет „Проф. д-р. Асен Златаров“, Факултет по технически науки
Катедра „Електроника, електротехника и машинознание“, sstoyanova_8000@abv.bg*

ВЪВЕДЕНИЕ

Несиметричните режими на трифазните четирипроводни системи се характеризират с различие в големината на амплитудата или на фазовата разлика между тока и напрежението на отделните фази или едновременна разлика на амплитудите и фазовите разлики.

Несиметричните режими могат да бъдат кратковременни и дълготрайни. Кратковременните несиметрични режими най-често възникват при аварийни състояния в електроенергийната система (напр. преходни несиметрични къси съединения). Дълготрайните несиметрични режими се дължат на несиметрия на напреженията на изводите на електроенергийните източници, несиметрия на параметрите на отделните фази на електропроводите, неравномерно разпределение на електрическите товари и непълнофазния режим на работа на електрическата мрежа.

При работа на многофазна система в несиметричен режим се снижава пропускателната способност на елементите на мрежата, получава се допълнително нагряване на електрическите машини, увеличават се загубите на електрическа мощност и енергия в системата на електроснабдяването. Изброените фактори влошават технико-икономическите показатели на процесите на генериране, предаване, преобразуване и консумиране на електрическата енергия, а понякога водят до аварии в системата на електроснабдяването на промишлените предприятия. Несиметрията също така води до повишаване на отклонението на напреженията в мрежата.

Икономическата оценка на загубите от несиметрия показва нарастване на капиталовложенията, увеличаване на загубите на активна и реактивна енергия, нарастване на разходите по поддръжката на съоръженията и в крайна сметка намаляване на икономическата ефективност на електроснабдителната система и електрообзавеждането на промишленото предприятие.

При избора на средства за симетриране икономически изгодно е на първо място да се използват основните средства, намиращи се в системата на електроснабдяване – кондензаторни батерии за напречна и надлъжна компенсация, силови филтри за висши хармоници и т.н. При избора на методите и средствата за симетриране на несиметрични товари трябва да се отчетат характера и режима на тяхната работа, схемите на включване и характеристиките на охранващата мрежа.

Най-често изискваното симетриране може да се постигне единствено с помощта на специални симетриращи устройства, от които най-ефективни се оказват статичните, изпълнени на базата на реактивни елементи.

ТЕОРЕТИЧНА ПОСТАНОВКА

Трифазната система от е.д.н. (респ. напрежения, токове) е съвкупност от три синусоидални величини, които имат една и съща честота, различават се помежду си по фаза и определят

режима на работа на трифазно устройство.

Трифазните системи са симетрични и несиметрични. При симетричната трифазна система от е.д.н. или токове амплитудните стойности на величините и ъглите на дефазирание помежду им са еднакви.

При изследване на несиметрични режими в трифазни вериги със статичен товар се разглеждат главно два случая:

- изследване на трифазни вериги при симетрична система напрежения на генератора и несиметричен товар;

- изследване на трифазни вериги при несиметрична система генераторни напрежения.

В първият случай симетричната система фазни напрежения на генератора се представя в комплексен вид така:

$$\dot{E}_1 = E \quad (2.1)$$

$$\dot{E}_2 = a^2 \cdot \dot{E}_1 = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot E \quad (2.2)$$

$$\dot{E}_3 = a \cdot \dot{E}_1 = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot E \quad (2.3)$$

Във вторият случай, ако са зададени големините на несиметричната система линейни напрежения на източника, тя се представя в комплексен вид, като се отчита, че алгебричната сума от моментните стойности на линейните напрежения е равна на нула и съответно техните вектори образуват затворен триъгълник. Когато са известни големините на несиметричната система фазни напрежения, за намиране на съответните комплекси е необходимо да бъдат зададени и фазните ъгли между тях.

Ако при свързването на консуматора в звезда звездната му точка е N , а звездната точка на генератора е O , първоначално се определя комплексното напрежение \dot{U}_{NO} между точките N и O въз основа на изразите:

- за трипроводна трифазна верига

$$\dot{U}_{NO} = \frac{\dot{U}_1 \cdot Y_1 + \dot{U}_2 \cdot Y_2 + \dot{U}_3 \cdot Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3} \quad (2.4)$$

- за четирипроводна трифазна верига

$$\dot{U}_{NO} = \frac{\dot{U}_1 \cdot Y_1 + \dot{U}_2 \cdot Y_2 + \dot{U}_3 \cdot Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_N} \quad (2.5)$$

При това Y_1 , Y_2 и Y_3 са еквивалентните комплексни проводимости на отделните фази, а Y_N е комплексната проводимост на неутралния проводник.

Фазните токове и напрежения се намират чрез обобщения закон на Ом:

$$i_1 = Y_1 \cdot (\dot{U}_1 - \dot{U}_{NO}); \quad i_2 = Y_2 \cdot (\dot{U}_2 - \dot{U}_{NO})$$

$$i_3 = Y_3 \cdot (\dot{U}_3 - \dot{U}_{NO}); \quad i_N = Y_N \cdot \dot{U}_{NO}$$
(2.6)

Трифазните вериги се състоят от три еднофазни вериги, които в повечето случаи са свързани в обща трифазна система. Всяка от трите еднофазни вериги се нарича фаза.

Симетричен трифазен консуматор е консуматор, при който комплексните съпротивления на всички фази са еднакви. Фазните вериги на трифазните устройства се свързват по два начина: в звезда и в триъгълник.

Ако несиметричен консуматор, свързан в звезда, се захрани със симетрична система линейни напрежения, потенциалът на нулевата точка на консуматора ще се различава от потенциала на нулевата точка на източника на напрежение. Нулевият проводник се използва при несиметрични системи, за да изравни потенциалите на звездните центрове на генератора и консуматора.

При периодичните несинусоидални процеси токовете и напреженията се изменят във времето по периодичен несинусоидален закон. Причините, които водят до наличие на несинусоидални режими на тока и напреженията в електрическите вериги, са две:

- източниците на енергия (електрическите генератори) осигуряват несинусоидални напрежения или токове поради несъвършенство в конструкцията или поради специалното си предназначение;

- във веригата са включени нелинейни елементи или елементи с променливи във времето параметри, които деформират синусоидалните режими на токовете и напреженията. Мощните еднофазни и трифазни несиметрични консуматори (например електродъгови пещи) е целесъобразно да се включват към електроенергийната система чрез отделен трансформатор на по-високо ниво на напрежение в точка с голяма мощност на късо съединение. Известно е, че ако $S_k \geq 50S_{едн}$, където S_k е мощността на късо съединение в точката на включване на еднофазния товар с мощност $S_{едн}$, то коефициентът на несиметрия на напрежението няма да превишава допустимата стойност от 2%. В изработеното лабораторно действащо устройство последователно са свързани два изправителни диода.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

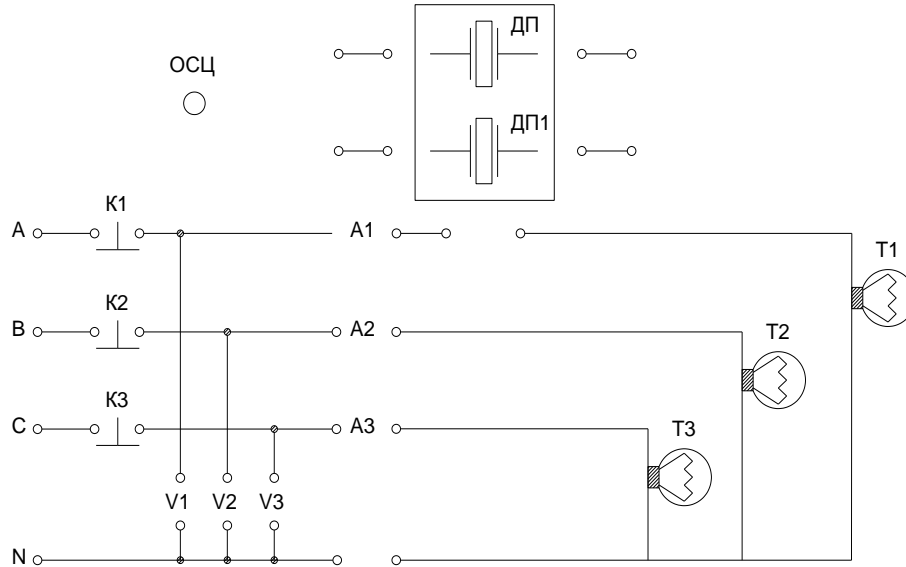
Схема на опитната постановка

Схемата на опитната постановка е трифазна четирипроводна и е дадена на фиг.1, а на фиг.2 – общ изглед.

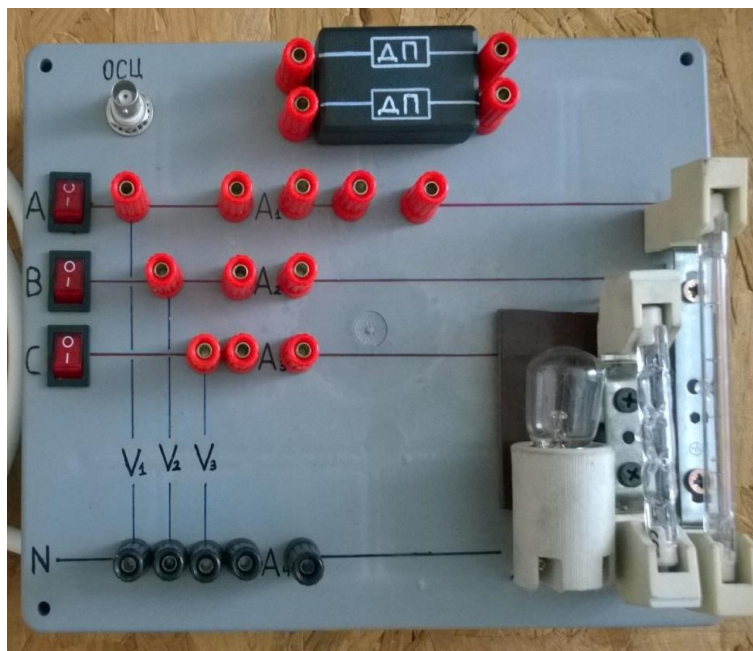
Опитната постановка е подходяща за имитиране на реалните режими в електрическата мрежа. Поставени са изводи за амперметрите ($A1, A2, A3, A4$) които измерват токовете във фазите A, B, C и тока през неутралния (N) проводник при несиметрично натоварване. Волтметрите ($V1, V2, V3$) служат за измерване на фазните напрежения. Буксата „ОСЦ“ е за включване на електронен осцилоскоп за визуализиране осцилограмата на фаза A . Като консуматори са включени три осветителни тела с различна мощност ($P_1 = 200 \text{ W}, P_2 = 100 \text{ W}, P_3 = 15 \text{ W}$). Те натоварват трифазната четирипроводна електрическа мрежа несиметрично. За получаване на нелинейни режими са поставени два изправителни диода, които на устройството

са отбелязани като „ДП“ и имитират дъгови пещи. С $K1$, $K2$, $K3$ са означени ключовете за включване на захранването. Изходът за осцилоскоп е означен с $ОСЦ$, който е свързан след понижаващ трансформатор с коефициент на трансформация 18,33.

Електрическата верига е захранена със синусоидално напрежение 380 V, честота 50 Hz.



фиг.1. Схема на опитната постановка за изследване на несиметрични и нелинейни режими в трифазните четирипроводни електрически мрежи



фиг.2. Общ изглед на опитната постановка за изследване на несиметрични и нелинейни режими в трифазните четирипроводни електрически мрежи

Резултати от експерименталните изследвания

Несиметрично натоварване на трифазна четирипроводна верига

таблица 1

U_1, V	U_2, V	U_3, V	I_1, A	I_2, A	I_3, A	I_4, A	P_1, W	P_2, W	P_3, W
230	230	230	0,91	0,42	0,03	0,76	209,3	96,6	6,9

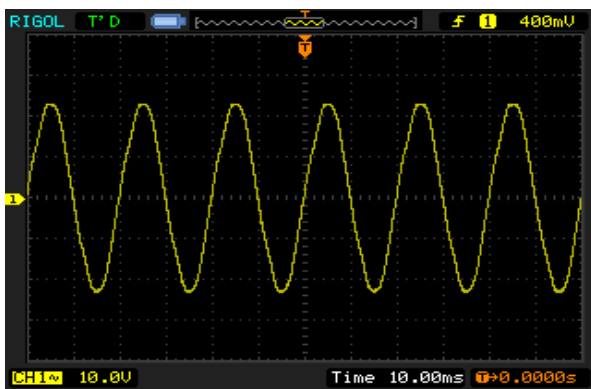
При несиметричното натоварване на трифазната четирипроводна верига измерените ефективни стойности на фазните напрежения са еднакви, но тези на токовете във фазите и нулевия проводник са различни, съответно и в измерените активни мощности има разлики. Напрежението се изменя по синусоидален закон (фиг.3).

Несиметрично натоварване и прекъснат нулев проводник

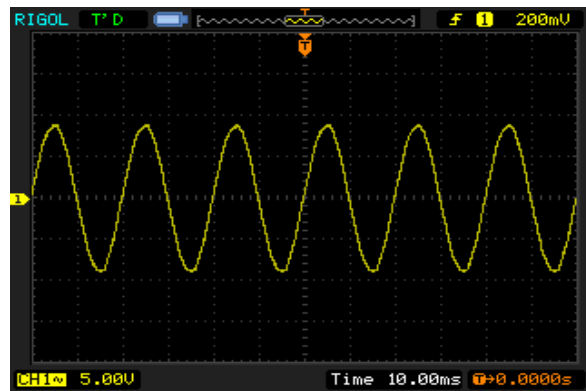
таблица 2

U_1, V	U_2, V	U_3, V	I_1, A	I_2, A	I_3, A	I_4, A	P_1, W	P_2, W	P_3, W
87	310	356	0,54	0,5	0,06	-	46,9	155	21,4

Напрежението е синусоидално (фиг.4), но заради прекъснатия нулев проводник фазните напрежения се различават, като фаза *A* е с най-голям товар и напрежението спада до 87 V , а другите фазни напрежения се увеличават като фазното напрежение на втора фаза достига до 310 V и това на третата фаза - до 356 V. Високите напрежения водят до намаляне на експлоатационния срок или до дефектиране на еднофазните консуматори.



фиг.3. Несиметрично натоварване на трифазна четирипроводна верига -фаза *A*



фиг.4. Несиметрично натоварване и прекъснат нулев проводник – фаза *A*

Несиметрично натоварване и нелинеен режим (включена дъгова пещ, последователно на товара T1 на фаза A)

таблица 3

U_1, V	U_2, V	U_3, V	I_1, A	I_2, A	I_3, A	I_4, A	P_1, W	P_2, W	P_3, W
230	230	230	0,61	0,42	0,03	0,48	140,3	96,6	6,9

При имитиране на дъгова пещ (изправителен диод последователно на товара T1) получената диаграма на осцилоскопа е несинусоидална (фиг.5), като отрицателният полупериод

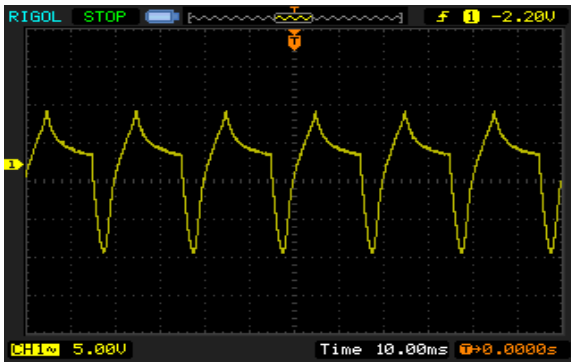
е стеснен, защото диодът е за голяма мощност и не се запущва веднага. Положителният полупериод се получава с изкривяване.

Несиметрично натоварване и нелинеен режим (включена дъгова пещ – диод последователно на товара Т1 на фаза А) и прекъснат нулев проводник

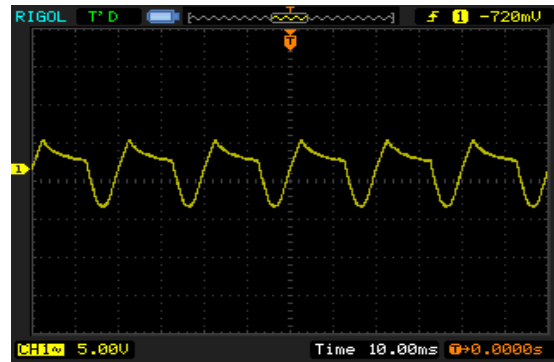
таблица 4

U_1, V	U_2, V	U_3, V	I_1, A	I_2, A	I_3, A	I_4, A	P_1, W	P_2, W	P_3, W
234	173	335	0,36	0,31	0,05	-	84,2	53,6	16,7

Прекъснатият нулев проводник води до увеличаване на фазното напрежение във фаза С до 335 V и намаляване във фаза В до 173 V. Получената осцилограма е подобна на тази от фиг.5, но с по – ниско напрежение (фиг.6).



фиг.5 Несиметрично натоварване-включена дъгова пещ на фаза А (нелинейна верига)



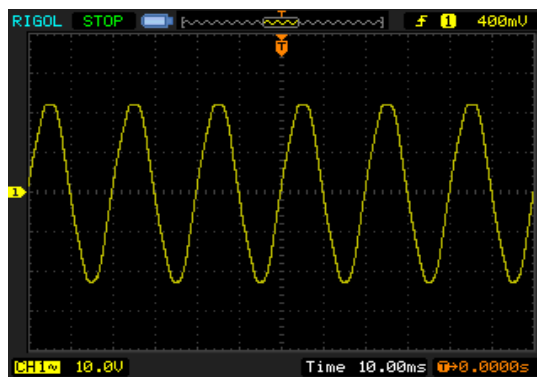
фиг.6. Несиметрично натоварване-включена дъгова пещ на фаза А и прекъснат нулев проводник (нелинейна верига)

Към фаза А са включени симетрично две дъгови пещи (паралелно противоположно свързани ДП и ДПІ, последователно на товара Т1)

таблица 5

U_1, V	U_2, V	U_3, V	I_1, A	I_2, A	I_3, A	I_4, A	P_1, W	P_2, W	P_3, W
230	230	230	0,91	0,42	0,03	0,76	209,3	96,6	6,9

Лабораторното устройство показва вече линеен режим режим (фиг.7).



фиг.7. Симетриране на товара (включени паралелно противоположно ДП и ДПП, последователно на товара T1)

Получената осцилограма е подобна на тази при несиметрично натоварване и линеен режим (фиг.3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проектирано е и е изработено лабораторно действащо устройство за симулиране и изследване на различни несиметрични и нелинейни режими в трифазна четирипроводна електрическа мрежа.

2. Изследван е режим при несиметрично натоварване с наличен неутрален проводник и линеен режим. Фазните напрежения са приблизително еднакви, но фазните токове са различни и поради тази причина в нулевия проводник протича ток.

3. При прекъсване на нулевия проводник фазните напрежения се променят така, че фазното напрежение с най-голям товар намалява до 87 V, а другите две фазни напрежения достигат до 356 V за фаза C и 310 V за фаза B. Токовете се изменят по синусоидален закон.

4. Изследван е режим при несиметрично натоварване с наличен неутрален проводник и нелинеен режим, постигнат чрез:

- последователно свързване към единия от консуматорите на изправителен диод (имитиране на дъгова пещ за постоянен ток с еднопътно изправяне): фазните напрежения остават приблизително еднакви, но токът във фаза A, където е свързана дъговата пещ, намалява. При прекъсване на неутралния проводник фазното напрежение на фаза B намалява до 173 V, а във фаза C напрежението се увеличава до 335 V и токовете се изменят по несинусоидален закон;

- последователно свързване към единия от консуматорите на два изправителни диода в схема „диак”(паралелно противоположно): получените резултати са като при линеен режим и несиметрично натоварване. Прекъсването на неутралния проводник води до увеличаване на някое от фазните напрежения, което при еднофазните консуматори води до повреда или до намаляване на експлоатационния им срок.

5. Получените от лабораторното изследване резултати са при реални активни консуматори, симетрично нелинейни.

6. Постигнатите резултати дават ясна представа за получените извън допустимите граници изкривявания при несиметрични линейни и нелинейни режими в трифазна четирипроводна електрическа мрежа. Същевременно изследванията могат в бъдеще да продължат и с други типове реални нелинейни консуматори, например битови електродвигатели при повишено напрежение, представляващи в този режим насищащи се индуктивности.

7. Лабораторното устройство може да се използва за обучение на студентите от

специалност „Електротехника“, ОКС „Магистър“, за симулиране и изследване на несиметрични и нелинейни режими в трифазна четирипроводна електрическа мрежа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агапиев В., Д. Пенкова. Проектиране на електроразпределителни мрежи и уредби. София, Техника, 1994.
2. Влъчков П.. Електрически мрежи и системи. София, Техника, 1990.
3. Неделчева С. Електрически мрежи. София, 2005.
4. Панамски И.. Ръководство за лабораторни упражнения по електрически измервания. София, Техника, 1990.
5. Стоянова С. Приложна електротехника - част първа. Издателство „Божич“, Бургас, 2012.
6. Стоянова С. Ръководство за лабораторни упражнения по теоретична електротехника. Бургас, 2014.