

## ВЪРХУ ЕДНА ВЪЗМОЖНОСТ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ТОКОСИМЕТРИРАЩИТЕ ЕЛЕМЕНТИ В ЕЛЕКТРОСНАБДИТЕЛНИТЕ СИСТЕМИ

Борислав Б. Цветанов  
Технически университет – Варна

## ON A POSSIBILITY TO DETERMINE CURRENT BALANCING ELEMENTS IN POWER SUPPLY SYSTEMS

Borislav B. Tzvetanov  
Technical University – Varna

**Abstract:** *In this publication, a practical application possibility for determining current balancing elements in power supply systems with the most general current asymmetry is considered. Dependencies are presented for determining the parameters of electrical balancing elements from inductances and capacitors with the possibility that current balancing can be carried out at a set cosine phi*

**Keywords:** *power supply system, general current asymmetry, current balancing elements, cosine phi.*

### Въведение

В публикацията се разглежда един подход за определяне на електрически симетриращи елементи при обща токова несиметрия в електроснабдителните системи (ЕСС) на индустриалните предприятия и фирми. С тази разработка се цели реализиране, при известни несиметрични товари (тяхна мощност и косинус  $\phi$ ), на удобен за практиката подход при определяне параметрите и характера (индуктивен или капацитивен) на симетриращите елементи включвани в системата.

От направен обзорен анализ на прилагани методи и технически средства за ограничаване на токовата несиметрия в ЕСС се вижда, че съществува голямо разнообразие в това отношение [1, 2, 3, 4 и 5]. Прилагането на едно или друго решение се обуславя от вида на несиметрията предизвикана от несиметричния товар (еднофазна, двуфазна, трифазна). Като едни от най разпространените технически подходи за токово симетриране на несиметрични товари се явава симетриране с прилагане на електрически елементи (комбинация от кондензатори и индуктивности). Известно такова решение в практиката е свързано с използване на схема „Щаймнец“. Това схемотехническо решение, поради своите добри показатели е намерило приложение при симетриране на еднофазни товари, които предварително се компенсират до косинус  $\phi$  единица. Има и вариантни решения на тази схема, но тя схемотехнически се усложнява повече отколкото традиционната такава.

**Аналитични и графични резултати**

Физическата основа на която почива принципа на симетриране е свързан с филтриране на обратната последователност на тока с използване на комбинация от реактивни капацитивни и индуктивни елементи. Ето защо симетриращите устройства от някои автори се наричат още филтросиметриращи. С цел реализиране на математически зависимости за определяне вида и големината на симетриращите реактивни елементи, в тази публикация се прилага подход използван в схемата на „Щаймнец“ при еднофазно включен, но компенсиран до косинус  $\phi$  електрически товар.

За да се проследи целият процес на трифазната несиметрия в натоварването на ЕСС до нейното токово симетриране, в публикацията се разглежда числен вариант на обща токова несиметрия. Приема се натоварване в едно цехово захранване със следните параметри на несиметричния товар:

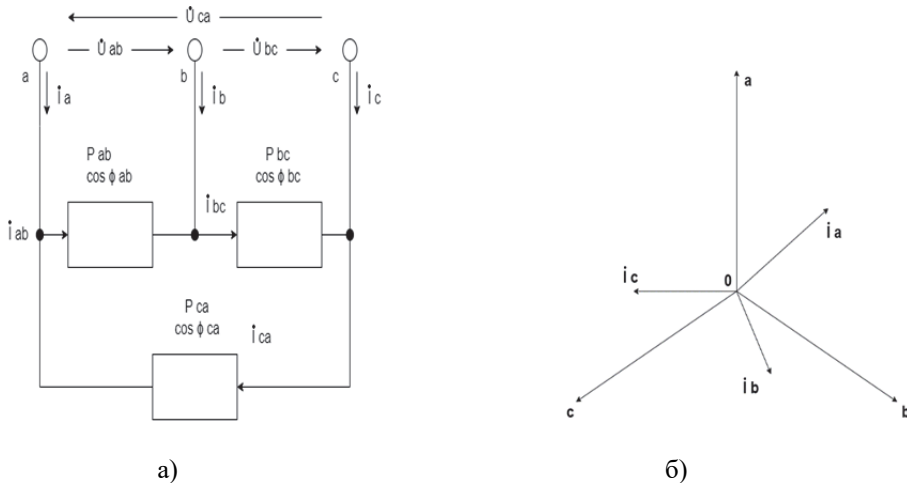
Захранващо напрежение на ЕСС:

$$U_{ab} = 380 \text{ V}, U_{bc} = 380 \text{ V}, U_{ca} = 380 \text{ V}$$

Параметри на несиметричния трифазен товар:

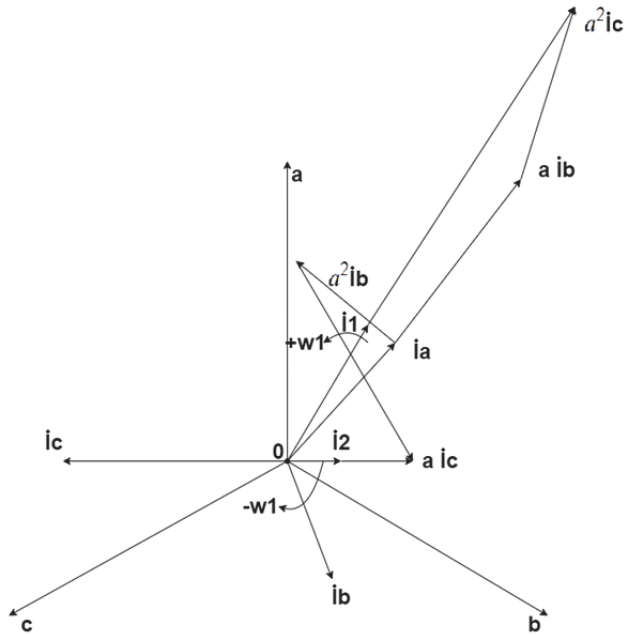
$$\begin{aligned} P_{ab} &= 100 \text{ kW}, \quad \cos \phi_{ab} = 0.50 \\ P_{bc} &= 200 \text{ kW}, \quad \cos \phi_{bc} = 0.70 \\ P_{ca} &= 300 \text{ kW}, \quad \cos \phi_{ca} = 0.86 \end{aligned} \tag{1}$$

На фиг.1а) и фиг.1б) са показани схемата на включване на товарите и векторната диаграма на несиметричните фазни токове.



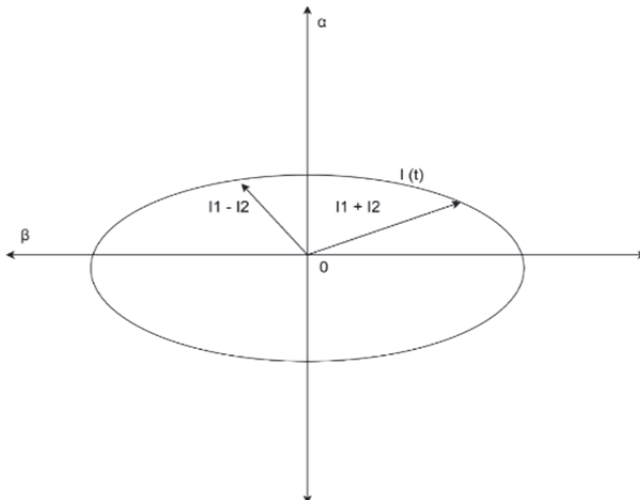
Фиг. 1

За да се анализира несиметрия в цеховото токово натоварване се извършва разлагане на несиметричните токове на симетрични съставки съгласно теорията на „Фортескю“ [6]. Правата и обратна последователности на токовете, след графоаналитично построяване придобиват модули и фази, както това е отразено съгласно фиг. 2.



Фиг. 2

За получаване на достоверна и обзрима информация за токовата несметрия в цеховото захранване е приложена теорията на „изобразяващия“ вектор. Полученият ходограф за трифазната токова система дава възможност за нагледна качествена и количествена оценка на степента на несиметрията. Тъй като обратната последователност на тока се върти със синхронна честота в противоположна посока на правата последователност, то ходографа описан от „изобразяващия“ вектор на тока при несиметрия е различен от окръжност и има вида показан на фиг. 3.



Фиг. 3

Голямата полуос на елипсата описана от ходографа на „изобразяващия“ вектор на тока се формира от сумата на правата и обратна последователност на тока. Малката полуос е изместена на 90 градуса по отношение на голямата полуос. Тя се образува като разлика от двете последователности.

Извеждане на зависимости за определяне на параметрите на елементите на устройство за симетриране на токово натоварване при най-общо несиметрично включване на потребители в ЕСС се реализира, като се използва утвърдената в теорията и практиката известна схема на „Щаймнец“ прилагана за симетриране на еднофазни товари. Мощностите на симетриращите елементи са равни на:

$$Q_c = Q_L = P/\sqrt{3} \quad (2)$$

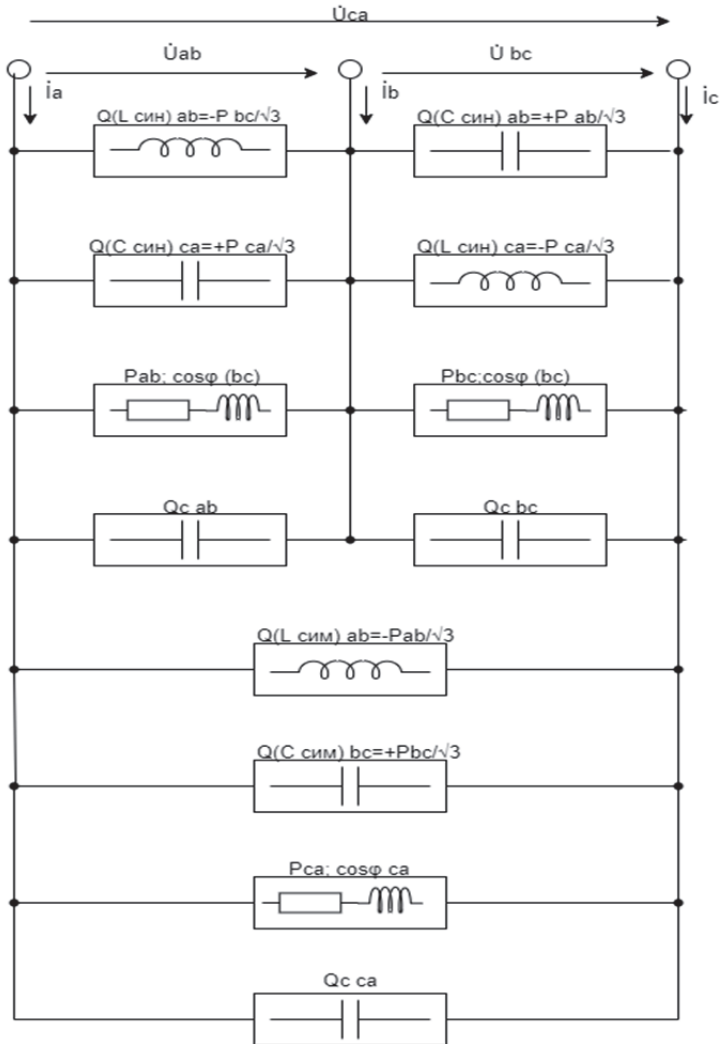
където:  $Q_c$  – представлява реактивна капацитивна мощност

$Q_L$  – представлява реактивна индуктивна мощност

$P$  – представлява активната мощност на несиметричния товар

По зависимост (2) се определят големините на симетриращите елементи на капацитивните и индуктивни съставлящи на симетриращото устройство. Те се включват в трифазната хранваща система от напрежение „а,в,с“ в последователност следваща посоката на часовниковата стрелка а именно: активна мощност на товара, реактивна капацитивна мощност на симетриращото устройство и реактивна индуктивна мощност на симетриращото устройство.

При трифазно несиметрично натоварване на ЕСС, токово симетриране може да се постигне като за всеки несиметричен товар включен на линейно напрежение се приложи схемата на „Щаймнец“, т.е. за трифазен несиметричен товар тя се прилага три пъти, както това е илюстрирано на фиг. 4.



Фиг. 4

където:  $P_{ab}$ ,  $P_{bc}$  и  $P_{ca}$  – представляват активните мощности на трифазния несиметричен товар

$Q_{ab}$ ,  $Q_{bc}$  и  $Q_{ca}$  – представляват реактивните мощности на трифазния несиметричен товар

$Q_{cav}$ ,  $Q_{cvc}$  и  $Q_{cca}$  – представляват реактивните капацитивни мощности за компенсация на косинус фи на товарите до единица

$Q_{L \text{ сим} ab}$ ,  $Q_{L \text{ сим} bc}$  и  $Q_{L \text{ сим} ca}$  – представляват реактивните индуктивни мощности за симетриране

$Q_{c \text{ сим} ab}$ ,  $Q_{c \text{ сим} bc}$  и  $Q_{c \text{ сим} ca}$  – представляват реактивните капацитивни мощности за симетриране

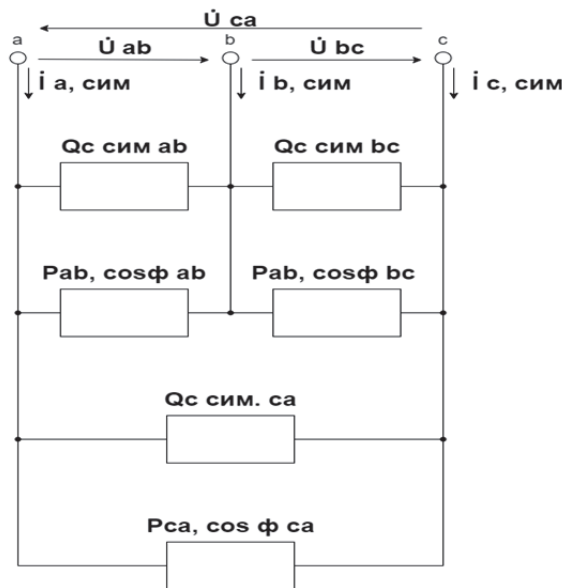
Отделните мощности за симетриране и компенсирание на косинус фи до единица на несиметричните товари се определят съгласно изразите:

$$\begin{aligned}
 Q_{с, сим\ ав} &= P_{ав} / \sqrt{3}, & Q_{с, сим\ вс} &= P_{вс} / \sqrt{3} & \text{и} & Q_{с, сим\ са} &= P_{са} / \sqrt{3} \\
 Q_{L сим\ ав} &= - P_{ав} / \sqrt{3}, & Q_{L сим\ вс} &= - P_{вс} / \sqrt{3} & \text{и} & Q_{L сим\ са} &= - P_{са} / \sqrt{3} \\
 Q_{с, комп\ ав} &= P_{ав} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{ав}} / \cos \varphi_{ав} & & & & & (3) \\
 Q_{с, комп\ вс} &= P_{вс} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{вс}} / \cos \varphi_{вс} \\
 Q_{с, комп\ са} &= P_{са} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{са}} / \cos \varphi_{са}
 \end{aligned}$$

При общото сумиране и определяне баланса на реактивните мощности между отделните фази на трифазната система приемаме капацитивните да носят знак плюс(+), а индуктивните знак минус (-) Тогава за резултативната реактивна мощност, която се включва между отделните фази на трифазната система съгласно фиг.4 се получават зависимостите (4), а именно:

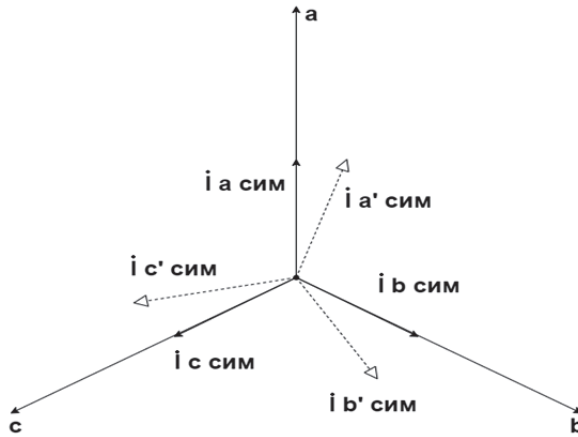
$$\begin{aligned}
 Q_{ав, сим} &= Q_{с, сим\ са} + Q_{L сим\ вс} + Q_{с, комп\ ав} = P_{са} / \sqrt{3} - P_{вс} / \sqrt{3} + P_{ав} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{ав}} / \cos \varphi_{ав} \\
 Q_{вс, сим} &= Q_{с, сим\ ав} + Q_{L сим\ ас} + Q_{с, комп\ вс} = P_{ав} / \sqrt{3} - P_{ас} / \sqrt{3} + P_{вс} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{вс}} / \cos \varphi_{вс} \\
 Q_{са, сим} &= Q_{с, сим\ вс} - Q_{L сим\ ав} + Q_{с, комп\ са} = P_{вс} / \sqrt{3} - P_{ав} / \sqrt{3} + P_{са} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{са}} / \cos \varphi_{са}
 \end{aligned} \quad (4)$$

Получените зависимости съгласно (4) дават възможност да се изчислят и определят елементите на симетриращото устройство, които трябва да се включат между отделните фази на ЕСС. Симетрирането на несиметричния товар в този случай се постига при резултативен косинус фи равен на единица. Съвместното включване на несиметричните ел.товари в ЕСС и елементите на симетриращото устройство са показани на фиг. 5.



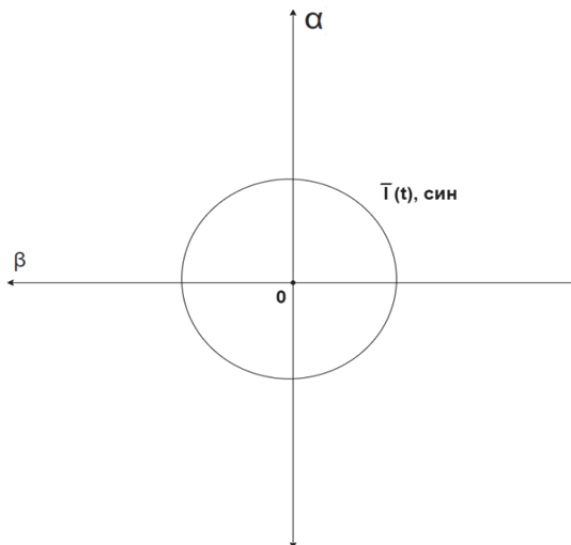
Фиг.5

Векторна диаграма на клоновите и фазни токове е построена на база параметрите на несиметричния товар в ЕСС съгласно (1) и определените параметри на елементите на симетриращото устройство съгласно изведените зависимости (4), като е отразена на фиг. 6.



Фиг. 6

От получената диаграма за фазните токове при симетриране в трифазната ЕСС се вижда, че трите тока за фазите „a“, „b“ и „c“ са равни по модул и фазово изместени по между си на 120 ел.градуса (показаните плътно начертани вектори). Това е и условието за пълна токова симетрия в системата. Тъгълът на фазовото изместване между фазите напрежения и съответните токове е нула. Косинус  $\phi$  при тези параметри на симетриращите елементи е равен на единица. Токовото симетриране на ЕСС се потвърждава и от вида на получения ходограф на „изобразяващия“ вектор на тока показан на фиг. 7.



Фиг. 7

От фигурата се вижда, че ходографа описван от токовете на трифазната система представлява окръжност, което означава, че токовата система от несиметричния товар е напълно симетрирана.

В случаите тогава, когато симетрирането на несиметричния товар трябва да се осъществи в уловията на предварително зададен желан косинус  $\phi$  е необходимо зависимости (4) да се допълнят с реактивна капацитивна мощност съответстваща на желан косинус  $\phi$ , а именно:

$$\begin{aligned} Q_{+ав,сим} &= Q_{ав,сим} + (P_{ав} + P_{вс} + P_{са}) / 3 \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \phi_{жел}} / \cos \phi_{жел} \\ Q_{+вс,сим} &= Q_{вс,сим} + (P_{ав} + P_{вс} + P_{са}) / 3 \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \phi_{жел}} / \cos \phi_{жел} \\ Q_{+са,сим} &= Q_{са,сим} + (P_{ав} + P_{вс} + P_{са}) / 3 \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \phi_{жел}} / \cos \phi_{жел} \end{aligned} \quad (5)$$

Ако при определяне на симетриращите елементи се приложат зависимости (5), то се получава токово симетриране при предварително зададен желан косинус  $\phi$ . На фиг. 6 са показани също така трите симетрирани фазни тока (с прекъснати линии) при зададен косинус  $\phi$ , в разглеждания случаи равен на 0.96. От получените резултати се вижда, че тока на обратната последователност е равна на нула, което е и гаранция, че несиметричния товар е токово симетриран.

В резултат от изложеното в публикацията могат да се направят следните обобщения:

### Изводи

1. Получените аналитични зависимости за изчисляване на електрическите симетриращи елементи при най-обща токова несиметрия в ЕСС дават възможност да се приложи практично-приложен подход за определяне на тяхната стойност и вид (индуктивен или капацитивен). По този начин се рационализират методите свързани с решаване на проблеми с токовата несиметрия в ЕСС.

2. Крайните стойности на получените реактивни елементи включвани в електроснабдителната система осигуряват не само токово симетриране, но и достигане на зададен желан косинус  $\phi$  на симетрирания трифазен товар.

3. Токовата несиметрия преди и след процеса на симетриране посредством определените аналитични зависимости са тествани с прилагане теорията на „изобразяващия“ вектор. Получените ходографи на съответните „изобразяващи“ вектори на тока по обзрим и недвусмислен начин отразяват токовото натоварване преди и след симетриране на ел.товар.

### Литература

1. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions 2010y
2. IEEE 61000-4-7 2002 „Electromagnetic Compatibility. Testing and Measurement Techniques- Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto”
3. Kusko A., Thompson M. „Power quality in electrical systems” ISBN 978-0-07-151002-8 2007
4. Шидловский А.К. Уравновешивание режимов многофазных цепей – Киев Наукова Думка 1990
5. Кузнецов В.Г., Григорев А.С., Данлюк В.Б. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в ел. сетях – Киев Наукова Думка 1992
6. Динов В.Р. Несиметрични режими и преходни процеси в електрическите машини ДИ-Техника 1974