

ОСОБЕНОСТИ ПРИ ДИРЕКТНО РЕГУЛИРАНЕ НА НАПРЕЖЕНИЕТО НА ТРАНСФОРМАТОРИ ЗА ЗАХРАНВАНЕ НА ЕЛЕКТРОДЪГОВИ ПЕЩИ

Кирил Стойков, Симона Филипова-Петракиева
k_stoykov@tu-sofia.bg, petrakievas-te@tu-sofia.bg

*Технически университет – София,
Електротехнически факултет, Факултет „Автоматика“
Бул. „Климент Охридски“ № 8, бл. 12, 1797, София,
БЪЛГАРИЯ*

***Ключови думи:** директно регулиране на напрежение, трансформатори за електродъгови печи*

***Резюме:** Всички трансформатори за захранване на електродъгови печи трябва да удовлетворяват изискванията на технологичния процес и да имат висока надежност, тъй като всяка повреда на трансформатора води до спиране на работа на електродъговата пещ. Ето защо, едно от основните изисквания на този тип трансформатори е да допускат регулиране на вторичното напрежение в широки граници и претоварване по ток в продължение на 1,5 – 2 часа (докато продължава разтопяването на материала). В настоящата работа е програмно реализирана в среда на Matlab съществуваща методика за изчисляване на това напрежение.*

1. Въведение

Съществуват различни начини за регулиране на вторичното напрежение на трансформатори, захранващи електродъгови печи. По същество всички те се основават на зависимостта:

$$U_2 = U_1 \frac{w_2}{w_1},$$

където U_1 и U_2 са ефективните стойности на фазовите напрежения съответно на първичната и вторична страни на трансформатора, а w_1 и w_2 - броя на навивките на първичната и вторична намотки.

От горния израз става ясно, че изменението на вторичното напрежение може да се реализира чрез изменение на броя на навивките на намотка ниско или високо напрежение при константни останали величини; или чрез изменение на първичното (захранващо) напрежение.

При първите два начина регулирането на напрежението е директно с една електромагнитна единица, т.е. един трансформатор, а при третия начин – индиректно (с няколко електромагнитни единици).

В зависимост от типа и характеристиките на електропещната уредба, захранващите трансформатори се изпълняват с различни схеми на регулиране [1, 2, 3].

В работата са разглеждани само някои особености на директното регулиране на напрежението на трансформатори, използвани за захранване на електродъгови пещи.

От техническата литература става ясно, че най-широко приложение намират схемите за регулиране на напрежението чрез изменение броя на навивките на намотка високо напрежение, т.е. чрез изменение индукцията в магнитопровода. В практиката такова регулиране се нарича “индукционно регулиране” на напрежението. Чрез изменение на броя на навивките на намотка високо напрежение се постига изменение на вторичното напрежение, т.е. налице е директна трансформация на напрежението при постоянно захранващо напрежение.

2. Аналитично определяне на вторичното напрежение на трансформатора

Нека броят на навивките на намотка високо напрежение е w_{10CH} (без регулационната намотка), а броят на регулационните стъпала - n_{CT} , като всички стъпала са с еднакъв брой навивки w_{CT} (това е възможно при регулационни намотки тип винтови или цилиндрични). При такава постановка на задачата броят на навивките на намотка високо напрежение е $w_{BH} = w_{10CH} + k \cdot w_{CT}$.

Вторичното напрежение за k – то стъпало се изменя по закона:

$$U_{2k} = U_1 \frac{w_2}{w_{10CH} + kw_{CT}}.$$

При изменение на k от 0 до пълния брой стъпала, зависимостта $U_{2k} = f(k)$ има хиперболичен вид. Това означава, че разликата между стойностите на вторичните напрежения за съседните стъпала ще бъде голяма в областта на максималните вторични напрежения и малка - в областта на минималните вторични напрежения.

От практиката е известно, че тези разлики на вторичните напрежения са приемливи за стоманодобивните пещи, тъй като в процеса на топене са необходими високи вторични напрежения (голям ток) с „по-груби“ стъпала, а в процеса на рафинация – ниски вторични напрежения с по-fino изменение на стъпалното напрежение. Обаче, в същото време този режим е неблагоприятен за стъпалния регулатор, тъй като той ще работи с повишени стъпални напрежения в областта на високите вторични напрежения, които се овладяват много трудно.

Това налага броят на навивките на отделните стъпала да се избере така, че вторичното напрежение да се изменя по-равномерно и стъпалните напрежения в момента на превключването да бъдат приблизително еднакви.

Освен това, за да се разшири диапазонът на регулиране на напрежението без да се увеличава разхода на активни материали, т.е. да се използва една и съща конструкция, в практиката се налага превключване на намотка високо напрежение от електрическо съединение “триъгълник” в електрическо съединение “звезда” и обратно.

За да се определят стойностите на U_2 при регулационни намотки с еднакъв брой навивки за всички стъпала, е удобно да се съставят универсални графики и таблици. За тази цел U_2 се изразява в относителни единици, а като променливи се въвеждат следните величини: дълбочината на регулиране K_U (отношението на максималното вторично напрежение към минималното такова), номерът на включеното стъпало k и общият брой на стъпалата n_{CT} .

Изразява се броят на навивките за стъпало като функция на променливите K_U , k и n_{CT} .

Ако намотка високо напрежение не се превключва от електрическо съединение “триъгълник” в електрическо съединение “звезда” и обратно, за броя на навивките на стъпало е в сила следната зависимост [3]:

$$w_{CT} = \frac{w_{IOCH}}{n_{CT}} (K_U - 1).$$

Респективно - ако намотка високо напрежение се превключва от електрическо съединение “триъгълник” в електрическо съединение “звезда” и обратно, за броя на навивките на стъпало е в сила следната зависимост [3]:

$$w_{CT} = \frac{w_{IOCH}}{n_{CT}} \left(\frac{K_U}{\sqrt{3}} - 1 \right).$$

Тогава броят на навивките за намотка високо напрежение при k включени стъпала за двете анализирани схеми е :

$$w_{BH} = w_{IOCH} \left[1 + \frac{k}{n_{CT}} (K_U - 1) \right] \quad \text{и} \quad w_{BH} = w_{IOCH} \left[1 + \frac{k}{n_{CT}} \left(\frac{K_U}{\sqrt{3}} - 1 \right) \right].$$

Вторичните напрежения за схемата без превключване и за схемата с превключване при k включено стъпало са съответно:

$$U_{2k} = \frac{U_{1\Phi} \cdot w_2}{w_{IOCH} \left[1 + \frac{k}{n_{CT}} (K_U - 1) \right]} \quad \text{и} \quad U_{2k} = \frac{U_{1\Phi} \cdot w_2}{w_{IOCH} \left[1 + \frac{k}{n_{CT}} \left(\frac{K_U}{\sqrt{3}} - 1 \right) \right]}.$$

В този случай съответните относителни стойности на вторичните напрежения са:

$$U_{2OIH} = \frac{1}{1 + \frac{k}{n_{CT}} (K_U - 1)} \quad \text{и} \quad U_{2OIH} = \frac{1}{1 + \frac{k}{n_{CT}} \left(\frac{K_U}{\sqrt{3}} - 1 \right)}.$$

3. Резултати от изчисленията

На базата на получените аналитични изрази са изчислените вторични напрежения (в относителни единици) са представени таблично и графично, както следва:

Таблица 1

$U_{2omh.} = \frac{1}{1 + \frac{k}{n_{cm}} (k_U - 1)}, \quad k_U = \sqrt{3}$												
k / n_{CT}	$n_{CT} = 2$	$n_{CT} = 3$	$n_{CT} = 4$	$n_{CT} = 5$	$n_{CT} = 6$	$n_{CT} = 7$	$n_{CT} = 8$	$n_{CT} = 9$	$n_{CT} = 10$	$n_{CT} = 11$	$n_{CT} = 12$	$n_{CT} = 13$
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0,732	0,803	0,845	0,872	0,891	0,905	0,916	0,924	0,931	0,937	0,942	0,946
2	0,577	0,672	0,732	0,773	0,803	0,827	0,845	0,860	0,872	0,882	0,891	0,898
3		0,577	0,645	0,694	0,732	0,761	0,784	0,803	0,819	0,833	0,845	0,855
4			0,577	0,630	0,672	0,705	0,732	0,754	0,773	0,789	0,803	0,816
5				0,577	0,621	0,656	0,686	0,710	0,732	0,750	0,766	0,780
6					0,577	0,614	0,645	0,672	0,694	0,714	0,732	0,747
7						0,577	0,609	0,637	0,661	0,682	0,700	0,717
8							0,577	0,605	0,630	0,652	0,672	0,689

9								0,577	0,602	0,625	0,645	0,664
10									0,577	0,600	0,621	0,640
11										0,577	0,598	0,617
12											0,577	0,596
13												0,577

Таблица 2

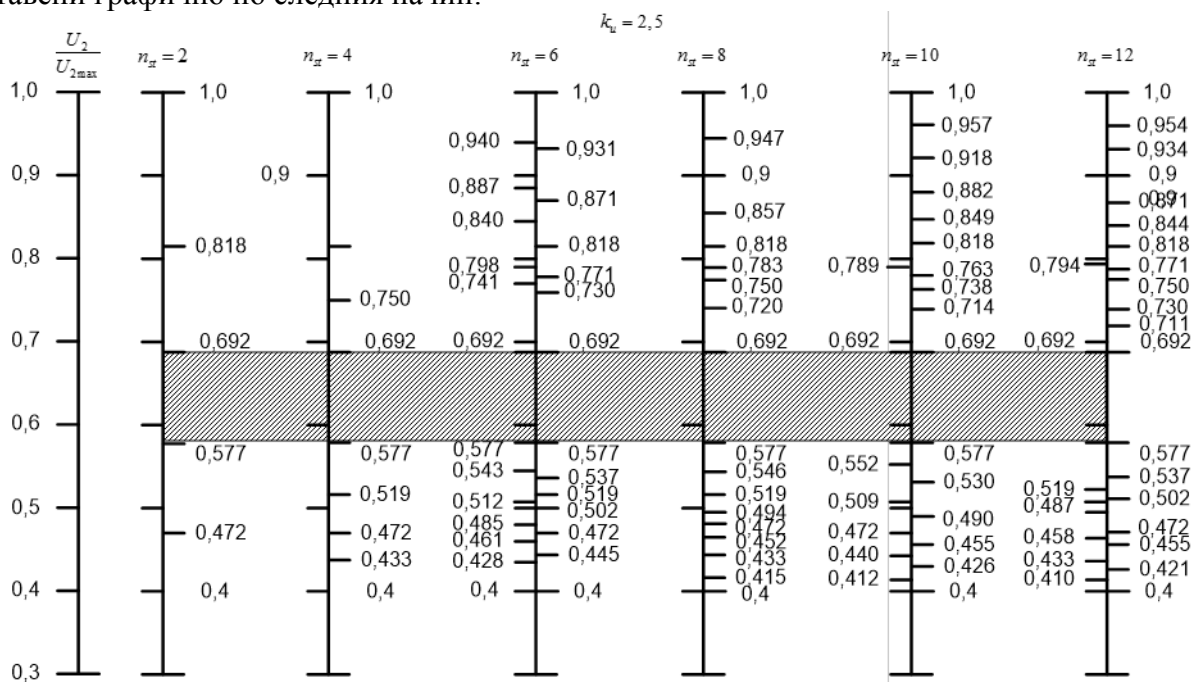
$U_{2\text{ омн.}} = \frac{1}{1 + \frac{k}{n_{cm}} \left(\frac{K_U}{\sqrt{3}} - 1 \right)}, \quad k_U = 2,5$												
k / n_{CT}	$n_{CT} = 3$		$n_{CT} = 5$		$n_{CT} = 7$		$n_{CT} = 9$		$n_{CT} = 11$		$n_{CT} = 13$	
	Δ	γ	Δ	γ	Δ	γ	Δ	γ	Δ	γ	Δ	γ
0	1	$1/\sqrt{3}$	1	$1/\sqrt{3}$	1	$1/\sqrt{3}$	1	$1/\sqrt{3}$	1	$1/\sqrt{3}$	1	$1/\sqrt{3}$
1	0,871	0,503	0,918	0,530	0,940	0,542	0,953	0,550	0,961	0,552	0,964	0,556
2	0,771	0,445	0,849	0,490	0,887	0,512	0,910	0,525	0,925	0,530	0,931	0,537
3	0,692	0,400	0,789	0,455	0,840	0,485	0,871	0,502	0,892	0,509	0,900	0,519
4			0,738	0,426	0,779	0,460	0,835	0,482	0,861	0,490	0,871	0,502
5			0,692	0,400	0,759	0,438	0,802	0,463	0,832	0,472	0,844	0,487
6					0,724	0,418	0,771	0,445	0,805	0,455	0,818	0,472
7					0,692	0,400	0,743	0,428	0,779	0,440	0,794	0,458
8							0,719	0,413	0,756	0,426	0,771	0,445
9							0,692	0,400	0,733	0,412	0,750	0,433
10									0,712	0,400	0,730	0,420
11									0,692		0,711	0,410
12											0,692	0,400

Таблица 3

$U_{2\text{ омн.}} = \frac{1}{1 + \frac{k}{n_{cm}} \left(\frac{K_U}{\sqrt{3}} - 1 \right)}, \quad k_U = 2,5$												
k / n_{CT}	$n_{CT} = 2$		$n_{CT} = 4$		$n_{CT} = 6$		$n_{CT} = 8$		$n_{CT} = 10$		$n_{CT} = 12$	
	Δ	γ	Δ	γ	Δ	γ	Δ	γ	Δ	γ	Δ	γ
0	1	$1/\sqrt{3}$	1	$1/\sqrt{3}$	1	$1/\sqrt{3}$	1	$1/\sqrt{3}$	1	$1/\sqrt{3}$	1	$1/\sqrt{3}$
1	0,818	0,472	0,900	0,519	0,931	0,537	0,947	0,546	0,957	0,552	0,964	0,556
2	0,692	0,400	0,818	0,472	0,871	0,502	0,900	0,519	0,918	0,530	0,931	0,537
3			0,750	0,433	0,818	0,472	0,857	0,494	0,882	0,509	0,900	0,519
4			0,692	0,400	0,771	0,445	0,818	0,472	0,849	0,490	0,871	0,502
5					0,730	0,421	0,783	0,452	0,818	0,472	0,844	0,487

6					0,692	0,400	0,750	0,433	0,789	0,455	0,818	0,472
7							0,720	0,415	0,763	0,440	0,794	0,458
8							0,692	0,400	0,738	0,426	0,771	0,445
9									0,714	0,412	0,750	0,433
10									0,692	0,400	0,730	0,420
11											0,711	0,410
12											0,692	0,400

Посочените в таблици 1, 2 и 3 резултати от изчисленията могат да бъдат представени графично по следния начин:



4. Програмна реализация на предложената методика за определяне на вторичните напрежения на трансформатора

Предложената в настоящата статия методика за определяне на относителните вторични напрежения при дълбоко регулиране на трансформатор, захранващ електро-дъгова пещ, е реализиран в среда на програмно за изчисляване на Matlab. Разработени са следните програми за извършване на изчисленията:

<pre> % tr_star_ku2.m % RELATIVE SECONDARY VOLTAGE ku=2 ku=ku/sqrt(3); U2_RELATIVE=[]; for k=0:1:13 for n=2:1:13 k=k; n=n; U2_rel=1/(1+k*(ku-1)/n); U2_RELATIVE=[U2_RELATIVE; U2_rel]; end end U2_RELATIVE=U2_RELATIVE </pre>	<p>Програмата изчислява стойността на $U_{2\text{отн.}}$, дефинирано съгласно формулата, $U_{2\text{отн.}} = \frac{1}{1 + \frac{k}{n_{cm}} \left(\frac{K_U}{\sqrt{3}} - 1 \right)},$ където варирането на k и n_{cm} е организирано чрез два вложени един в друг цикъла – съответно по k и по n_{cm}.</p>
<pre> % volt_control_ku2.m % RELATIVE SECONDARY VOLTAGE ku=2 U2_RELATIVE=[]; for k=0:1:13 for n=2:1:13 k=k; n=n; U2_rel=1/(1+k*(ku-1)/n); U2_RELATIVE=[U2_RELATIVE; U2_rel]; end end U2_RELATIVE=U2_RELATIVE </pre>	<p>Програмата изчислява стойността на $U_{2\text{отн.}}$, дефинирано съгласно формулата, $U_{2\text{отн.}} = \frac{1}{1 + \frac{k}{n_{cm}} (K_U - 1)},$ където варирането на k и n_{cm} е организирано чрез два вложени един в друг цикъла – съответно по k и по n_{cm}.</p>

5. Заключение

Разработени са универсални таблици и графики за относителните стойности на вторичните напрежения с помощта на които може да се избере схема на регулиране на напрежението при приблизително равномерни стъпални напрежени, с което се подобрява работният режим на стъпалния регулатор.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дачев А. Оразмеряване на стъпалата на регулационната намотка на трансформатори с голям диапазон на регулиране. Доклад на I-^{ва} Национална конференция Елпром '76. София. 1976.
- [2] Дачев А., Стойков К. Анализ и сравнение на някои схеми за директно регулиране на напрежението при електропещни трансформатори. Втори младежки симпозиум с международно участие СИЕЛТ – 83. Пловдив. 1983.
- [3] Стойков К. Специални проблеми при проектирането на захранващи устройства за електрически пещи. Дисертация. ТУ-София. 2011.

SOME FEATURES IN DIRECT VOLTAGE CONTROL OF THE TRANSFORMERS IN SUPPLYING THE ELECTRIC FURNANCES

Kiril Stoykov, Simona Filipova-Petrakieva
k_stoykov@tu-sofia.bg, petrakievas-te@tu-sofia.bg

*Technical University of Sofia, Electrical Faculty, Faculty of Automation
8 Kliment Ohridski, blvd., bl. 12, 1797, Sofia,
BULGARIA*

Key words: *direct voltage control, transformers for electric furnances*

Abstract: *All transformers for supplying the electric furnances have to satisfy the requirements of the technological process and to have high reliability, because each breakdown of the transformer leads to stop the work of the electrical furnance. Thus, one of the main requirements for these transformers is to allow control of the secondary voltage in large intervals and current overloading for 1,5 – 2 hours (until the metal melt up). In the paper, a methodology for calculating this voltage is programmed in Matlab environment.*