

АКТИВНО СЪПРОТИВЛЕНИЕ НА ЕЛЕКТРОПРОВОДИ С НЕСИНУСОИДАЛНИ ТОКОВЕ

Стефан Чобанов¹, Менто Ментешев²

¹ CMC-C EOOD, Пирдоп, stefan.chobanov@cmc-c.com

² CMC-C EOOD, Пирдоп, mento.menteshev@cmc-c.com

РЕЗЮМЕ. Генерираните висши хармоници предизвикват нарастване на активното съпротивление на електропроводите в резултат на повърхностния ефект. Изследвано е влиянието на амплитудно-честотния спектър на висшите хармоници върху съпротивлението на кабелни електропроводи и въздушни линии с неизолирани проводници и произтичащите от това нарастващи загуби на напрежение и на активна мощност.

Ключови думи: хармоници, повърхностен ефект, активно съпротивление

ACTIVE RESISTANCE OF POWER LINES WITH NON-SINUSOIDAL

Stefan Chobanov¹, Mento Menteshhev²

¹ CMC-C Ltd, Pirdop, stefan.chobanov@cmc-c.com

² CMC-C Ltd, Pirdop, mento.menteshev@cmc-c.com

ABSTRACT. The generated high harmonics are causing an increase in the active resistance of the power lines due to the surface effect. The influence of amplitude-frequency spectrum of the high harmonics on the resistance of cables power lines and air cable lines with non insulated wires and the resulting from this increasing losses of voltage and active power are researched in the report.

Key words: harmonics, surface effect, active resistance

Съвременните промишлени електрически мрежи се характеризират с нарастващото присъствие на висши хармоници, генерирани от несинусоидалността на тока и напрежението [Нейман, Жежеленко, Василев, Данков].

Една от основните причини е масовото приложение на честотно управляеми задвижвания на управляемите и неуправляемите изправители и инвертори, на газоразрядните източници на светлина [Жежеленко, Василев, Данков].

В промишлени системи с несинусоидални токове и напрежения е възприето да се отчитат всичките хармоници с честота до 25 пъти по-голяма от промишлената честота (50Hz), а за по-точни изчисления тази кратност нараства до 31, т.е. 1550Hz [Василев, Данков].

В каталожната и справочна литература са зададени съпротивленията на кабели и проводници за постоянен ток (DC) и за променлив ток (AC) с честота 50/60 Hz [Филкаб]. При висши хармоници в тока не е коректно тези данни, както за активното съпротивление, така и за индуктивността да се използват за изчисление на загубите в електропроводите. С увеличаване на честотата на тока, съгласно теорията на електромагнитното поле [Нейман], съпротивлението на проводниците нараства, а индуктивността им намалява вследствие повърхностния ефект.

Явлението повърхностен ефект предизвиква неравномерно разпределение на променливия ток по сечението на проводника и плътността на тока по повърхността на проводника е по-голяма в сравнение със средната му част.

Този ефект нараства с увеличаване на честотата. Върху активното съпротивление на проводниците влияят и токовете на Фуко, възникващи в проводящи тела, разположени в променливо магнитно реле [Нейман].

Така активното съпротивление, което ще бъде обект на внимание, ще се определя от сечението на тръба, чиято дебелина зависи от така наречената еквивалентна дълбочина на проникване на тока

$$b = \frac{1}{\sqrt{\pi f \cdot \mu \gamma}} \quad (1)$$

където:

f - честота

μ – абсолютната магнитна проницаемост

γ – специфичната проводимост

За проводници от мед и алуминий може да се получи опростена формула, допускайки че относителната магнитна проницаемост е $\mu_r = 1$. Така за меден проводник $\mu = 1,2566310^{-6}$, за алуминиев проводник

$\mu = 1,2566610^{-6}$, докато магнитната константа е $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,25664$.

Грешките от заместването на μ с μ_0 са: за меден проводник – 0,0008%, за алуминиев проводник 0,0016% - пренебрежимо малки.

Така (1) придобива вида:

$$b = \frac{1}{2\pi\sqrt{f \cdot \gamma \cdot 10^{-7}}} \quad (2)$$

Електрическата проводимост γ зависи от вида на проводника, използван в кабелите и въздушните линии [Филкаб]. Възприети са следните средни стойности, дадени в таблица 1.

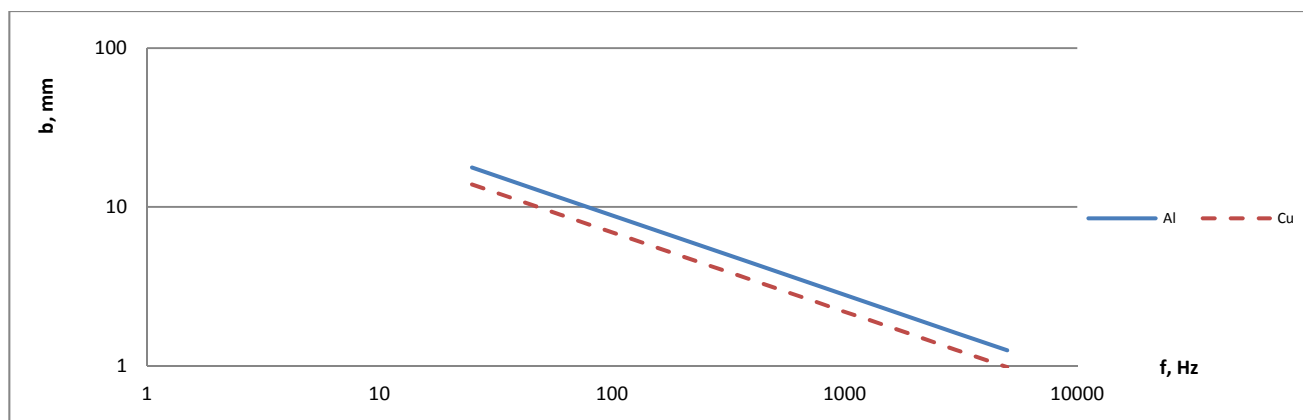
По (2) и от данните на таблица 1, за честоти от 25 до 5000Hz е изчислено проникването b за различни електропроводи, а резултатите са показани графично на фиг. 1 и фиг. 2, а частично и в таблица 2.

Таблица 1.

Електропровод	Изчислена осреднена специфична проводимост, S/m.10 ⁶ , за проводници		
	Мед	Алуминий	Алуминий-стомана (ВЛ)
Кабели с PVC и XLPE изолация	53,1	32,4	-
Неизолирани проводници за ВЛ – НН и СрН	52,1	31,3	30,6

Таблица 2.

Честота, Hz			50	150	250	350	550	950	1250	1550
Проникване, b, mm	Кабели	Cu	9,78	5,65	4,37	3,70	2,95	2,24	1,96	1,76
		Al	12,50	7,22	5,59	4,73	3,77	2,87	2,50	2,25
	Неизолирани Проводници, ВЛ	M	9,86	5,69	4,41	3,73	2,97	2,26	1,97	1,77
		A	12,72	7,35	5,69	4,81	3,84	2,92	2,54	2,29
		AC	12,93	7,47	5,78	4,89	3,90	2,97	2,59	2,33



Фиг. 1. Проникване на тока в проводниците на медни и алуминиеви кабели

От данните, посочени в таблица 2, може да се оцени количествено разликата в проникването b в кръгли проводници на кабели и в неизолирани проводници за въздушни електропроводи. Тези разлики за медни проводници достигат +1,88%, за алуминиеви +3,39%, а за алуминиево-стоманени проводници +6,48% в полза на неизолираните проводници.

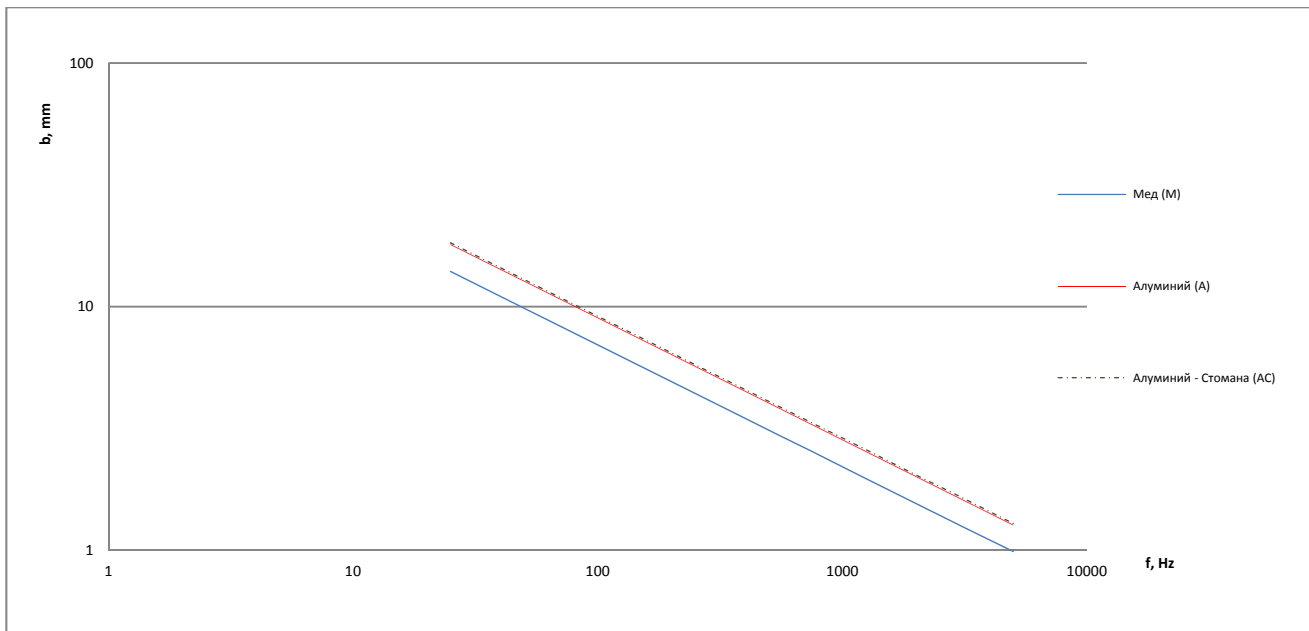
При нарастване на честотата от 50Hz ($k=1$) до 1550Hz ($k=31$) проникването намалява за всички видове проводници приблизително 5,55 пъти с разлика в границите на +1,36%.

Когато проникването b е по-голямо или равно на радиуса на проводника, т.е. $2b \geq d$, активното съпротивление не се променя, тъй като ток протича през цялото сечение S на проводника, определено по основния диаметър d ($S = \frac{\pi d^2}{4}$).

Когато $2b \leq d$, тогава сечението на проводника, през който преминава тока $S' < S$ и се определя от израза:

$$S' = \pi b(d - b), mm^2 \quad (3)$$

и ще определя нарастването на активното му съпротивление. От (2) и (3) следва, че увеличаването на съпротивлението ще бъде функция на честотата f , специфичното съпротивление γ (от което зависи понижаването на тока b) и от диаметъра на проводника.



Фиг. 2. Проникване на тока в неизолирани проводници от мед (М), алуминий (А) и алуминий – стомана (АС) за въздушни линии НН и СрН

В техническата литература [Василев, Данков] се препоръчва формулата за определяне на активното съпротивление за трансформатори, двигатели и генератори с изрична уговорка за приблизителност на получените резултати, в зависимост от кратността на честотата спрямо промишлената (50Hz).

$$R_k = \sqrt{k^l} \cdot R_1 \quad (4)$$

където:

R_1 - съпротивление на проводника при честота 50Hz, Ω ;

k - коефициент на кратност на честота f_k спрямо 50Hz, в случая пореден номер на хармоника;

R_k - съпротивление на проводника за честотата f_k, Ω .

Изчисление по тази формула за електропроводи е неподходящо, защото води до значителни грешки, надвишаващи 200% за хармониците с висока кратност.

В справочната и каталожна литература активното съпротивление на различните типове кабели, неизолирани и изолирани проводници е посочено при честота 50Hz, в зависимост от сечението S , за дължина 1km и е означено с $r_o, \Omega/km$ [Филкаб].

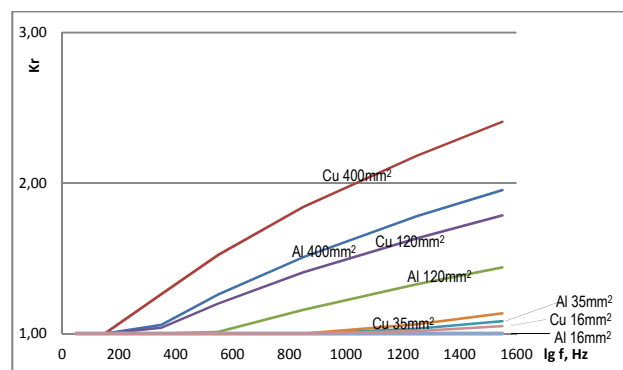
Целесъобразно е нарастването на активното съпротивление r на проводниците вследствие на повърхностния ефект, зависещ от честотата на тока, да се изчисли за 1km и се сравни с r_o . Така отношението:

$$\frac{r}{r_o} = k_r \quad (5)$$

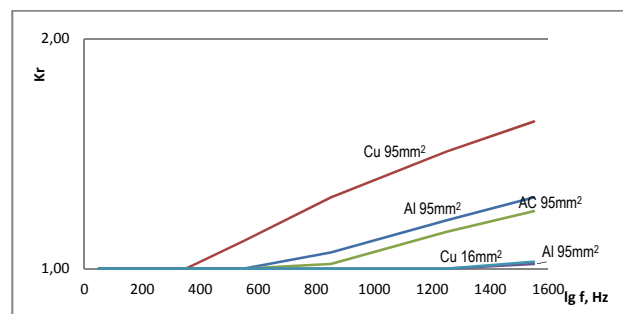
ще характеризира увеличаване на активното съпротивление за различни конструкции и сечения на проводниците.

Кратността на нарастване на активното съпротивление k_r на кабелни електропроводи и въздушни линии с неизолирани проводници (НН и СрН) със сечение от 16 до 500mm² и при честота от 50 до 1550Hz, характерни за

съставните хармоници при несинусоидалните токове са дадени на фиг. 3 и фиг. 4.



Фиг. 3. Коефициент k_r за увеличаване на съпротивлението на медни и алуминиеви кабелни електропроводи



Фиг. 4. Коефициент k_r за увеличаване на съпротивлението на М, А и АС неизолирани проводници

Най-голямата стойност на k_r , т.е. най-значителното нарастване на съпротивлението естествено е при 31-ви хармоник, при медните кабелни електропроводи - 263%, при алуминиевите кабелни електропроводи - 223%, а при неизолирани проводници (до 95mm²). k_r нараства за М проводници до 164%, за А проводници до 131% и за АС проводници - 125%, което е по-малко спрямо тези за кабелните електропроводи със същото сечение (95mm²).

Анализът на получените резултати показва, че в електропроводите с по-голямо сечение, повърхностният ефект се проявява по-силно и съпротивлението се увеличава при една и съща честота. Например, при 17-ти хармоник съпротивлението на кабел със сечение 50mm² се увеличава едва с 2%, при кабел 120mm² съпротивлението се увеличава с 41%, а при кабел 500mm² то достига 201%.

Да отбележим, че с нарастването на честотата се променя индуктивното съпротивление на електропроводите, което в общия случай се характеризира с вътрешна, външна и взаимна индуктивност [Нейман]. С увеличаване на честотата на генерираните от несинусоидалния ток висши хармоници, индуктивността L намалява, но индуктивното съпротивление $X_L = k\omega L$ нараства с увеличаване на честотата $k\omega = k \cdot 2\pi \cdot 50$, макар и в по-малка степен. Така в електропроводите общото съпротивление Z ще нараства с двата си компоненти - активно и индуктивно, което ще определя повишените загуби в него и които подлежат на допълнително изследване.

Заклучение

В електропроводите с несинусоидален ток увеличеното активно съпротивление може да се повлияе при оценка на загубите в зависимост от амплитудно-честотния спектър

на съставните хармоници. За всеки конкретен случай това влияние трябва да се оцени количествено като необходимо условие, за да бъде пренебрегнато или взето предвид.

Литература

- Нейман, Л.Р., К.С. Демиржан, 1966. Теоретические основы электротехники Энергия, М.
Жежеленко, И.В., 1984. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий, Энергоатом издат, М.
Василев, Н., С. Сидеров, 1991. Електроснабдяване на промишлените предприятия, Техника, С.
Данков, Е., 1991. Електроснабдяване на минните предприятия, Техника, С.
IEEE 1549-2010 (стандарт)
Ghassemi, F., 2013. Should the theory of power be reviewed? Workshop on PDP under Nonsinusoidal conditions, Milano,
Филкаб, 2012. Технически справочник. Пловдив.

Статията е рецензирана от инж. Милен Дренков