

Иван Темелковски  
Михаил Дигаловски  
Горан Рафајловски  
ФЕИТ, Скопје

## **АНАЛИТИЧКО И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА ЗАГУБИТЕ НА МОЌНОСТ ВО МАГНЕТНОТО КОЛО КАЈ АСИНХРОНИТЕ МОТОРИ ПОД ДЕЈСТВО НА ВИШИТЕ ХАРМОНИЦИ**

### **КУСА СОДРЖИНА**

Асинхроните мотори претставуваат вртливи електрични машини изработени за употреба при номинална фреквенција и при синусни облици на напонот и на струјата на оптоварување. Сепак, поради најразлични фактори, облиците на напонот и на струјата на оптоварување честопати отстапуваат од нивниот идеален синусен облик. Нарушувањето на идеалниот синусен облик, најчесто се случува поради повратните влијанија од електричната мрежа и поради поголеми отстапувања на параметрите на квалитетот на електричната енергија во точката на напојување на асинхронниот мотор. Исто така, отстапување од синусните облици на напонот и на струјата се јавува кога асинхронниот мотор се напојува преку инвертор. Тоа изобличување на синусните облици на напонот и на струјата доведува до зголемени загуби на моќност во асинхронниот мотор, од причина што се застапени вишите хармоници и притоа се јавува дополнително загревање на неговите поодделни компоненти. Како резултат на тоа се јавува побрзо стареење на изолацијата и намалување на животниот век на асинхронниот мотор, односно може побрзо да настане дефект.

Во овој труд е разгледан трифазен асинхрон нисконапонски мотор чија номинална моќност изнесува 0,75 kW, кој еднаш е напојуван директно од мрежа, а другпат е напојуван преку напонски инвертор, кој симулира електричен извор со присуство на широк спектар на виши хармоници и истиот работи во празен од. Во лабораториски услови, од обидот на празен од, определени се загубите на моќност во магнетното коло и механичките загуби, поодделно. Потоа, со помош на анализатор на моќност се измерени загубите во магнетното коло при напојување од мрежа и при напојување преку инвертор, додека, по аналитички пат истите се добиени врз основа на математички модел за пресметка на загубите во магнетното коло во зависност од редот на вишите хармоници и од амплитудата на магнетната индукција. Притоа, направена е квалитативна и квантитавна споредба на резултатите добиени од мерењата и резултатите што се добиени по аналитички пат.

Клучни зборови: магнетно коло, загуби на моќност, виши хармоници

### **1 ВОВЕД**

Развојот на технологијата што се применува при управувањето на асинхроните мотори резултира со сè поголема примена на инверторите. Тоа, пред сè, се должи на фактот дека на овој начин се овозможува многу полесна и пофина регулација на асинхроните мотори. Сепак, врз основа на експериментални и на аналитички пресметки се покажува дека напојувањето на асинхроните мотори преку инвертори е придружено и со зголемени загуби на моќност во магнетното коло, кои пак се резултат на широкиот спектар на виши хармоници генерирани од страна на електронските компоненти на инверторот.

Денес, примената на електричните мотори е навистина широка и истите претставуваат главни потрошувачи на електричната енергија. Токму затоа, зголемените загуби на моќност што би се јавиле во магнетното коло имаат значителен ефект, како од енергетски, така и од финансиски аспект, особено за индустријата. Имајќи предвид дека при нивната изработка, електричните мотори вообичаено се проектираат за работа при синусен напон на напојување и при номинална фреквенција, јасно е дека присуството на какви било виши хармоници ќе се одрази негативно врз работата на истите. Знаејќи дека загубите на моќност што се јавуваат во магнетното коло на асинхроните мотори зависат од магнетната индукција и од фреквенцијата на напонот на напојување, нема сомнение дека присуството на виши хармоници ќе влијаат врз истите. Имено, вишите хармоници во својата суштина претставуваат напони и струи чии фреквенции се толку пати поголеми од фреквенцијата на основниот хармоник, колку што впрочем е и нивниот ред. Оттука, јасно е дека зголеменото ниво на хармониците не само што е причина за изобличување на електричните големини, туку предизвикува и дополнителни загуби на моќност во магнетното коло, што доведува до зголемување на температурата на магнетното коло, а со тоа и до намалување на животниот век на асинхроните мотори.

Врз основа на фактите изложени погоре, јасно е дека од огромно значење е да се проучи каков е ефектот што генерираните хармоници од повисок ред го имаат врз загубите на моќност во магнетното коло на асинхроните мотори.

## **2 ЗАГУБИ НА МОЌНОСТ ВО ПРАЗЕН ОД**

### **2.1 Загуби на моќност поради магнетен хистерезис**

Дел од вкупните загуби на моќност што се јавуваат во магнетното коло на асинхроните мотори претставуваат загубите на моќност поради појавата на магнетен хистерезис. Јачината на магнетното поле воспоставено од струјата што протекува низ статорската намотка на асинхроните мотори се менува поради тоа што оваа намотка е приклучена на наизменичен напон. Од друга страна, во магнетните лимови од кои се изработува статорското јадро на асинхроните мотори се присутни т.н. елементарни молекуларни магнетни домени, кои се поставуваат во соодветната насока воспоставена од магнетното поле.

Јасно е дека секогаш кога доаѓа до промена на насоката на магнетното поле воспоставено од струјата низ статорската намотка, впрочем доаѓа и до преорентација и на овие елементарни молекуларни магнетни домени. Овие елементарни молекуларни магнетни домени се одликуваат со способноста да се спротивставуваат на магнетизирањето и на демагнетизирањето поради променливиот карактер на магнетното поле, па токму тоа доведува до појава на загубите на моќност поради магнетниот хистерезис. Така, со цел да се овозможи оваа преориентација на елементарните магнетни домени, потребна е енергија, која, пак, потекнува од статорската намотка на асинхрониот мотор, но истата не се пренесува на неговата роторска намотка. Врз база на оваа констатација, воопшто не е тешко да се изведе заклучок дека ова претставува последица на загубите на моќност поради појавата на магнетниот хистерезис.

Како резултат на отпорот што го воспоставуваат елементарните молекуларни магнетни домени, јасно е дека карактеристиката на магнетизирање е двозначна, т.е. двете криви формираат т.н. хистерезна јамка. Токму површината на вакаформираната хистерезна јамка е еднаква на енергијата што не се враќа во изворот, туку се претвора во топлина. Имајќи предвид дека за секој период на промена на напонот, односно за струјата, одговара една хистерезна јамка што притоа се формира, лесно се заклучува дека загубите на моќност поради магнетен хистерезис зависат пропорционално и од фреквенцијата на промената.

Во принцип, проценето е дека загубите на моќност поради појавата на магнетен хистерезис во асинхроните мотори изнесуваат 50% од загубите на моќност во магнетното коло на истите за т.н. CRGO (ладно валани магнетни лимови или магнетни лимови со зрнеста ориентација), изработени според вообичаената постапка на изработување.

Загубите на моќност поради појавата на магнетен хистерезис се дадени со следнава релација:

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_m^{1.6} \quad (\text{W/kg}) \quad (1)$$

каде

$K_h$ -константа на загубите на моќност поради магнетен хистерезис

$f$ - фреквенција (Hz)

$B_m$ — максимална вредност намагнетната индукција (T)

## 2.2 Загуби на моќност поради виорни струи

Другиот дел од загубите на моќност во магнетното коло на асинхроните мотори се резултат на променливиот магнетен флуks, кој пак зависи правопрпорционално како од магнетната индукција, така и од фреквенцијата. Кога магнетното коло е изложено на променливо магнетно поле, во него се индуцира напон и протекуваат струи, чиј интензитет зависи од магнетниот отпор на јадрото и од магнетниот флуks. Овие струи се наречени виорни струи и како резултат на големиот електричен отпор на железото, истите имаат мал интензитет. Може да се заклучи дека големината на овие виорни струи што се јавуваат во магнетните лимови е обратнопропорционална од материјалот од кои истите се изработени, но правопрпорционална од дебелината на истите. На тој начин, за специфичните загуби на моќност (загуби на моќност по единица маса) што се јавуваат во магнетното јадро се добива дека зависат од квадратот на магнетната индукција, од квадратот на фреквенцијата, но и од дебелината на магнетните лимови од кои е изработено истото. Проценето е дека загубите на моќност поради постоење на т.н. виорни струи учествуваат со удел од 50% во вкупните загуби на моќност во магнетното коло на асинхроните мотори. Загубите на моќност поради виорни струи аналитички можат да се пресметаат според следнава равенка:

$$P_v = K_v \cdot B_m^2 \cdot f^2 \cdot t^2 \quad (\text{W/kg}) \quad (2)$$

каде

$K_v$ — константа на загубите на моќност поради виорни струи

$f$ — фреквенција во херци (Hz)

$B_m$ — максимална вредност намагнетната индукција (T)

$t$  — дебелина на магнетните лимови

## 2.3 Влијанија на вишите хармоници врз загубите на моќност во празен од

Производството на асинхроните мотори вообичаено подразбира истите да бидат проектирани на тој начин, така што загубите на моќност што ќе се јават во истите да бидат минимални кога асинхрониот мотор ќе биде приклучен на номинален напон чиј облик е синусоидален и при номинална фреквенција и кога истиот ќе работи при номинално оптоварување, т.е. струјата на оптоварување ќе биде номинална и ќе има синусоидален облик. Поради сè поголемата застапеност на елементите од енергетската електроника при управувањето на асинхроните мотори, како и поради сè поголемите повратни влијанија од електричната мрежа што се јавуваат последниве години, брановиот облик на напоните и на струите бездруго отстапува од чистиот синусен облик. Во таа насока, од суштинско значење е определувањето на загубите на моќност во магнетното коло на асинхроните мотори и под вакви околности. Нека со  $P_{NL}$  се означат загубите на моќност во магнетното коло на асинхрониот мотор определени експериментално, додека со  $P_{NLn}$  се означат загубите на моќност земени како референтни (добиеени по аналитички пат).

Притоа, важи следнава релација [4]:

$$P_{NL} = P_{NLn} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{K_{fi} \cdot K_{Bi}^{1.6} + K_{fi}^2 \cdot K_{Bi}^2}{2} = P_{NLn} \cdot K' \quad (3)$$

каде

$i$  – ред на вишиот хармоник

$K'$  - коефициент

$K_{fi} = \frac{f_i}{f_1}$  - коефициент на однос на фреквенциите

$K_{Bi} = \frac{B_{mi}}{B_{m1}}$  - коефициент на однос на магнетните индукции

### 3 РЕЗУЛТАТИ ОД МЕРЕЊАТА

Врз основа на мерењата, за загубите на моќност во празен од се добиени следниве вредности:

$P_0 = 141$  (W) – загуби на моќност во празен од

Со одземање на механичките и дополнителните загуби на моќност од загубите на моќност во празен од, за загубите на моќност во магнетното коло кога асинхрониот мотор е приклучен директно на мрежа се добива:

$P_{NL} = P_{NLn} = 130,801$  (W) – кога асинхрониот мотор е приклучен на напојување директно на мрежа

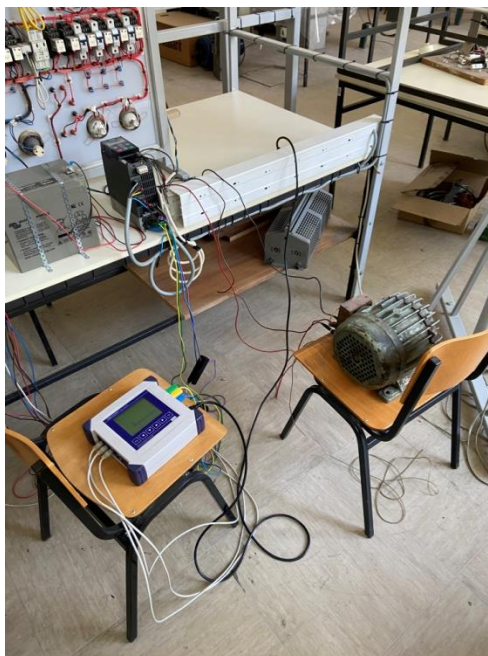
На сличен начин, за загубите на моќност кога асинхрониот мотор е приклучен да се напојува преку инвертор, се добива:

$P_{NL} = 157,701$  (W) – кога асинхрониот мотор се напојува преку инвертор

На сликите 1 и 2, даден е приказ на мерната опрема. Мерењата се реализирани со мрежен анализатор OMNI-QUANT Mobil. Измерените загуби на моќност во магнетното коло при идеален синусен облик на напонот се земени како референтни ( $P_{NL} = P_{NLn}$ ). По аналитички пат добиени се резултатите дадени во табелата 1.



Слика 1 Приказ на мрежниот анализатор OMNI-QUANT Mobil



Слика 2 Напојување на асинхронниот мотор преку напонски инвертор

Табела 1 Резултати од мерењата и од аналитичките пресметки

Приклучен да се напојува преку инвертор					
Ред на хармоникот ( $l$ ) (измерено)	Амплитуда на $B_m$ (%) (измерено)			Средна вредност за $K'(l)$ (пресметано)	Вредност за $P_{NLl}(W)$ (пресметано)
3	19	18	20	1,207425	157,936
5	2	3,9	2		
6	4	4	4,1		
7	4,2	4,2	4,25		
9	2	1,5	1,3		
11	8,5	9	8,6		
12	1	1,5	1		
14	1,9	2,1	2		

#### 4 ЗАКЛУЧОК

Врз основа на резултатите може да се заклучи дека ефектот што вишите хармоници го имаат врз загубите на моќност во магнетното коло на асинхроните мотори воопшто не е занемарлив, особено ако се земаат предвид евентуалните последици до кои може да дојде притоа. Се воочува дека зголемувањето на загубите на моќност во магнетното коло на асинхроните мотори што се јавуваат при напојување преку инверторот е дури за 17,06% поголемо во однос на загубите на моќност во магнетното коло што се јавуваат кога асинхронниот мотор е приклучен директно на мрежата. Земајќи ги предвид резултатите добиени експериментално, како и резултатите што се добиени аналитички, потврдена е високата прецизност што аналитичкиот модел јас овозможува при пресметката на загубите на моќност што се јавуваат во магнетното коло на асинхронниот мотор. Вредноста на загубите на моќност во магнетното коло добиена при мерењата изнесува 157,701 W, додека вредноста добиена по аналитички пат е 157,94 W, што говори за мошне занемарлива отстапка од само 0,15%.

## 5 ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chiasson J., "Modeling and high performance control of electric machines", IEEE PRESS, John Wiley and Sons, INC. Publication New York, 2005.
- [2] Kenjo T., "Electric motors and their control", Oxford University Press, 1999.
- [3] Mihail Digalovski, Krste Najdenkoski, Goran Rafajlovski. "Impact of current high order harmonic to core losses of three-phase distribution transformer". Proceedings of EUROCON 2013 (IEEE, Region 8), pp. 1531-1535, Zagreb, Croatia.
- [4] Најденкоски К., Темелковски И., "Збирка задачи по предметот Електрични генератори и трансформатори", ФЕИТ, Скопје 2022.