

Утицај конфигурације намотаја на хармонијски састав индукованог напона хидрогенератора

Influence of winding configuration on the harmonic composition of the induced voltage of a hydrogenerator

Сергеј Стајшић, Дејан Јеркан, *Факултет техничких наука, Нови Сад*

Студијски програм – Енергетика, електроника и телекомуникације

Кратак садржај – У раду је анализиран утицај конструкције намотаја на хармонијски састав индукованог напона хидрогенератора. Детаљно је приказана конструкција хидрогенератора, као и основни појмови који се односе на намотаје, магнетопобудну (МПС) и електромоторну силу (ЕМС). Разматрана је метода коначних елемената која се користи за анализу магнетских појава у машини, као и појам виших хармоника и њихових показатеља. Сprovedена је анализа машине код које се у спектру индукованог напона јављају нежељени хармоници, након чега је предложена корекција корака намотаја статора. Извршене симулације показале су да предложена измена доводи до побољшања магнетског састава и радних перформанси машине.

Кључне речи: Хидрогенератор, метода коначних елемената, електромоторна сила, *magnetopobudna sila*, намотаји, хармонијско изобличење,

Abstract – This paper analyzes the influence of winding design on the harmonic composition of the induced voltage in a hydrogenerator. The construction of the hydrogenerator is presented in detail, along with the fundamental concepts related to windings, magnetomotive force (MMF), and electromotive force (EMF). The finite element method is applied to analyze magnetic phenomena in the machine, as well as the occurrence and indicators of higher harmonics. A case study was conducted on a machine exhibiting undesired harmonic components in its voltage spectrum. A correction of the stator winding pitch was proposed, which improved the machine's harmonic response. The effectiveness of the proposed modification was verified through simulation results.

Keywords: Hydrogenerator, Finite elements method, electromotive force, magnetomotive force, windings, harmonic distortion

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био др Дејан Јеркан, вандредни професор

1. УВОД

Хидрогенератори (ХГ) представљају окосницу производње електричне енергије у многим електроенергетским системима (ЕЕС) широм света. Њихова примарна улога је конверзија механичке енергије хидрауличне турбине у електричну енергију, а одликује их поузданост, дуг радни век и, у односу на друге технологије, знатно боља флексибилност за брзо покретање и регулацију снаге.



Слика 1. Ротор хидрогенератора

Иако су ХГ пројектовани за рад у идеалном синусном режиму, услед неидеалности магнетног кола (жлебови у статору и ротору) и zasiћења феромагнетног материјала, долази до деформације магнетског поља и, последично, појаве виших хармоника у индукованом напону. Ово хармонијско изобличење нарушава квалитет електричне енергије и изазива низ негативних појава.

Кључно је да се нежељена појава, која се квантификује преко укупне хармонијске дисторзије (THD), минимизује.

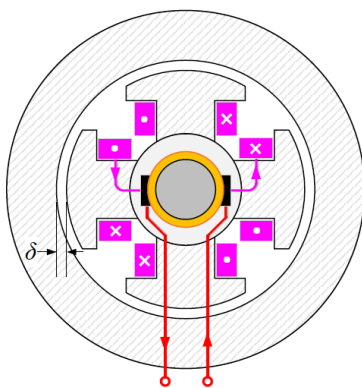
Циљ овог рада је да се детаљном анализом, применом софтвера који имплементира методу коначних елемената, испита утицај скраћења навојног корака на хармонијски састав индукованог напона хидрогенератора. Разматрају се резултати симулација машине код које се јавља хармонијско изобличење, након чега се предлаже и доказује корекција која доводи до побољшања квалитета индукованог напона.

2. ХИДРОГЕНЕРАТОРИ

2.1. Конструкција

Статор свих машина наизменичне струје конструише се од ламинираног феромагнетног језгра са жлебовима, што је неопходно ради смањења губитака услед вртложних струја. У жлебове се смештају активни проводници статорског намотаја.

Хидрогенератори, као синхроне машине, користе ротор са истакнутим половима и великим пречником, прилагођен малим брзинама обртања хидрауличних турбина. Због тога морају имати велики број полова да би постигли стандардну мрежну фреквенцију. Ротор садржи побудни намотај (за стварање магнетног поља) и пригушни намотај (за стабилизацију при поремећајима).



Слика 2. Синхрона машина са истакнутим половима [3]

Намотај статора је најчешће трофазни и расподељен (проводници су у већем броју жлебова), јер се тиме постиже да резултујућа магнетопобудна сила (МПС) буде што ближе идеалном синусоидалном облику. Поред расподеле, кључна техника је скраћивање навојног корака (тетивно намотавање). Коришћење ових техника доводи до смањења укупне индуковане електромоторне силе (ЕМС), што се у прорачунима корегује увођењем навојних сачиниоца:

1. Тетивни навојни сачинилац – описује смањење ЕМС услед скраћивања корака.
2. Појасни навојни сачинилац – описује смањење ЕМС због просторне расподеле намотаја у више жлебова.

Оба сачиниоца, у комбинацији, одређују укупни навојни сачинилац потребан за прецизан прорачун стварне ЕМС машине.

2.2. МПС расподељеног намотаја

Код машина наизменичне струје, није прихватљива правоугаона расподела магнетопобудне силе (МПС), јер би такав облик изазвао појаву правоугаоне електромоторне силе (ЕМС) у проводницима статора, што није пожељно у пракси. Циљ је да облик ЕМС што више одговара синусоидном (простопериодичном).

Да би се то постигло, намотај се распоређује у већи број жлебова по унутрашњем ободу статора, што резултује расподељеним намотајем. Услед овакве конструкције, расподела МПС више није правоугаона

већ добија степеначаст облик који се приближава синусоидном и назива се квазихармонична расподела. Вредност магнетопобудне силе у појединим тачкама обода одређује се **Амперовим законом**, интегрисањем магнетног поља дуж затворених контура које обухватају различит број ампернавојака. На тај начин се добија просторна расподела МПС, која представља основу за анализу поља у машини.

Квазихармонична расподела магнетопобудне силе $F(\vartheta)$ је периодична функција по угловној координати ϑ , па се може развити у Фуријеов ред:

$$F(\vartheta) = F_1 \sin(\vartheta) + F_3 \sin(3\vartheta) + F_5 \sin(5\vartheta) + \dots \quad (1)$$

где су $F_1, F_3, F_5, \dots$ амплитуде појединих хармоничних компоненти.

Амплитуда хармоника вишег реда опада са редом ν , приближно као $1/\nu$, што значи да највећи утицај на облик МПС и ЕМС имају нижег реда хармоници (најчешће трећи, пети и седми). Управо ови хармоници представљају главни извор одступања од идеално синусног таласа индукованог напона, због чега се у конструкцији намотаја предузимају мере за њихово потискивање (попут скраћења корака намотаја или одговарајућег распореда проводника).

2.3. Расподела индукције и флукс по полу

Магнетски флукс Φ представља укупан број линија магнетне индукције које пролазе кроз дату површину. У ротационим машинама, због хармонијске расподеле индукције по обиму, проводници под једним полом налазе се у пољу различитог интензитета индукције B . Због тога се уводи средња вредност магнетне индукције B_{sr} , на основу које се дефинише флукс по полу:

$$\Phi_p = S_p \cdot B_{sr} = \tau_p \cdot l \cdot B_{sr} \quad (2)$$

где је τ_p полни корак, а l ефективна дужина гвожђа.

Ако је расподела индукције синусоидна, флукс по полу може се изразити и преко максималне индукције B_m :

$$\Phi_p = S_p \cdot B_{sr} = \tau_p \cdot l \cdot B_{sr} \quad (3)$$

Ова величина представља кључни параметар за израчунавање ефективне вредности индукованог напона једне фазе:

$$E = 4,44 \cdot f \cdot N_a \cdot k_n \cdot \Phi_p \quad (4)$$

где је f фреквенција, N_a број навојака по фази, а k_n укупни навојни сачинилац.

Услед конструкције полова ротора, расподела магнетне индукције B у ваздушном зазору није идеално простопериодична. Та нехармонична расподела може се представити као сума основне хармоничне компоненте и низа виших хармоника, од којих сваки индукује одговарајућу компоненту електромоторне силе (ЕМС) у проводницима статора. Најчешће примењив метод за побољшање облика индукованог напона и елиминацију нежељених хармоника јесте скраћење корака секције. Принцип је следећи: хармоник реда ν елиминише се када се навојни корак скрати према односу

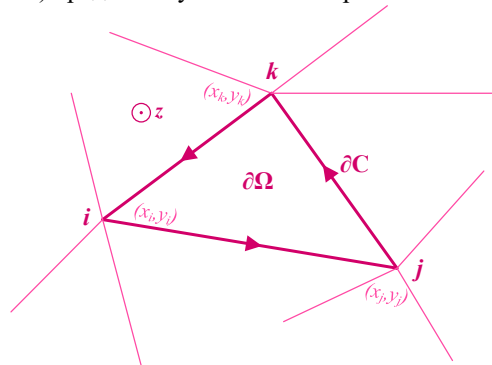
$$\frac{y}{\tau_p} = 1 - \frac{1}{\nu} \quad (5)$$

3. МЕТОДА КОНАЧНИХ ЕЛЕМЕНАТА

Метода коначних елемената, позната и као Finite Element Analysis (FEA), је нумеричко-графичка метода која се користи за прецизно решавање електромагнетских поља у доменима сложене геометрије, као што су савремене ротационе електричне машине.

Метода коначних елемената се заснива на Максвеловим једначинама које описују електромагнетно поље. За потребе анализе електричних машина, поље се најчешће посматра као квазистатичко (занемарује се утицај померајне струје), а за даљу формулацију се уводе потенцијали (магнетски вектор потенцијал A).

Суштина методе је у томе што се цела област од интереса (нпр. попречни пресек електричне машине) дели на мноштво мањих, дисјунктних делова који се називају коначни елементи (најчешће троуглови). Уместо решавања комплексних диференцијалних једначина у целом континуалном домену, методом коначних елемената се решава вредност електромагнетских величина (првенствено магнетског вектор потенцијала) само у чворовима (теменима) ових елемената. Вредност унутар самог елемента се затим добија једноставном интерполацијом (најчешће линеарном) вредности у његовим чворовима.



Слика 3. Коначни елемент у облику троугаоног сегмента [2]

Овим поступком, континуални проблем се претвара у систем алгебарских једначина који се може решити на рачунару.

4. ВИШИ ХАРМОНИЦИ У ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИМ СИСТЕМИМА

Савремени електроенергетски системи све више су изложени појави сложенепериодичних радних режима услед масовне примене уређаја енергетске електронике, који уносе значајне нелинеарности у систем. Присуство виших хармоника у напонима и струјама доводи до изобличења таласних облика, смањења енергетске ефикасности и појаве различитих негативних ефеката као што су прегревање трансформатора, мотора и неутралних проводника, поремећаји у раду мерних инструмената и заштитних уређаја, као и интерференције са телекомуникационим сигнаlima.

Квалитет електричне енергије уско је повезан са степеном одступања таласних облика напона и струја

од идеалних синусоидних. За квантитативно оцењивање изобличења користе се стандардизовани показатељи као што су укупна и индивидуална хармонијска дисторзија (THD, HD), крест фактор и фактор снаге λ . Ови параметри дефинисани су међународним стандардима (попут IEEE-519) и омогућавају праћење утицаја хармоника на квалитет напајања.

Табела 1. Неки индикатори квалитета електричне енергије

Индикатор	Дефиниција	Главна примена
Укупна хармонијска дисторзија (THDU, THDI)	$\sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}{U_1^2}}, \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}}$	Описивање нивоа виших хармоника, стандарди
Индивидуална хармонијска дисторзија (HD U_n , HD I_n)	$\frac{U_n}{U_1}, \frac{I_n}{I_1}$	Описивање нивоа виших хармоника, стандарди
Фактор снаге (PF, λ)	$\frac{P_{tot}}{ U_{eff} I_{eff} }$	Наплате реактивне и хармонијске снаге

5. СИМУЛАЦИЈЕ НА РАЗВИЈЕНОМ МОДЕЛУ

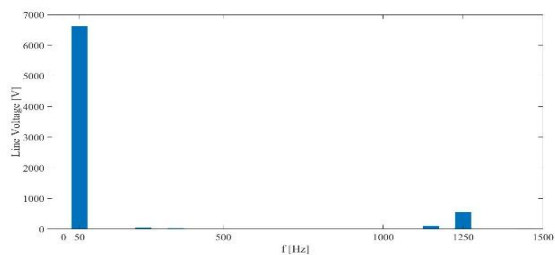
У овом поглављу ће се извршити анализа утицаја корекције статорског намотаја, односно скраћења навојног корака, на хармонијско изобличење индуковане електромоторне силе (ЕМС) у режиму празног хода. Као основа за анализу ће послужити модел хидрогенератора оригиналне конструкције и једна његова варијација изведена на нивоу симулационог модела, која представља модификацију намотаја са аспекта скраћења корака намотавања. Над моделима, креираним у програмском пакету Ansys, извршене су електромагнетске симулације којима се опонаша рад генератора у режиму празног хода при синхроној брзини обртања.

Табела 2. Каталогски подаци генератора

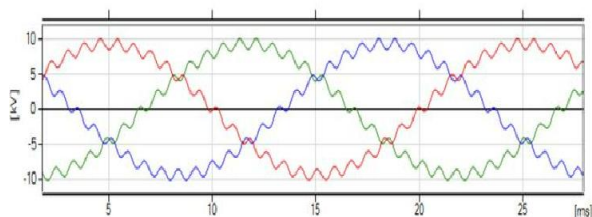
Подаци хидрогенератора	
Снага [kVA]	1583
Фреквенција [Hz]	50
Номинални напон [V]	6600
Номинална брзина обртања [rpm]	750
Број пари полова	4
Спољашњи пречник статора [mm]	1100
Дужина лим пакета [mm]	760
Број жлебова статора	96

Као одговор ових симулација добијају се вредности вектора магнетске индукције, које се користе за прорачун флуksних обухвата и хармонијског спектра индуковане ЕМС. На слици 4 приказан је хармонијски спектар индукованог линијског напона за модел

оригиналне конструкције хидрогенератора. Јасно се уочава доминантна компонента на основној фреквенцији (50 Hz), али и присуство значајне нежељене компоненте напона 25. хармоника (на фреквенцији 1250Hz).

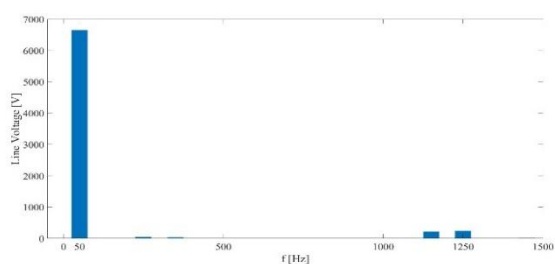


Слика 4. Хармонијски спектар индукованог линијског напона у режиму празног хода

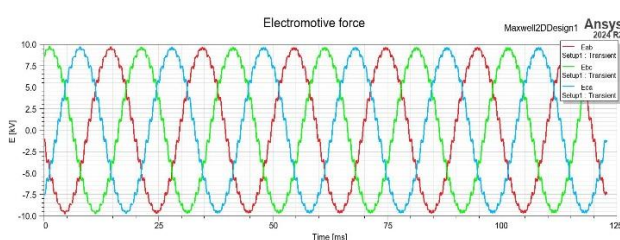


Слика 5. Таласни облик индукованог линијског напона у режиму празног хода

Да би се редуковала амплитуда 25. хармоника, предложено је кориговање корака намотавања статорског намотаја. Извршена је измена модела и симулација је поновљена. На слици 6 приказан је хармонијски спектар индукованог линијског напона за модел са коригованим кораком намотавања. Уочава се да је променом корака намотаја постигнута ефикасна редукација амплитуде 25. хармоника. Ова корекција је усклађена са теоријом о утицају тетивног навојног сачиниоца на више хармонике и представља конструкцијско решење за побољшање таласног облика индуковане ЕМС.



Слика 6. Хармонијски спектар индукованог линијског напона у режиму празног хода, након промене корака намотавања



Слика 7. Таласни облик индукованог линијског напона у режиму празног хода, након промене корака намотавања

6. ЗАКЉУЧАК

У овом раду детаљно је приказан утицај конструкције намотаја хидрогенератора на његове електромагнетне величине и квалитет индуковане електромоторне силе (ЕМС). Извршена је анализа хармонијског изобличења линијског напона, која је показала присуство значајног нежељеног 25. хармоника у режиму празног хода машине.

На практичном примеру, применом Методе коначних елемената у софтверском пакету Ansys, извршена је упоредна анализа оригиналне конструкције и модела са коригованим (скраћеним) кораком намотавања. Установљен је директан и значајан утицај скраћења корака на редукацију амплитуде 25. хармоника. Овај конструктивни параметар показао се као кључно средство за побољшање чистоће таласног облика напона, што наводи на закључак да се о оптимизацији корака намотавања мора посебно водити рачуна у фази пројектовања и реконструкције синхроних машина, како би се задовољили критеријуми квалитета електричне енергије.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] С. Вукосавић, „Електричне машине“, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет, Академска мисао, Београд, 2010.
- [2] Д. Јеркан, „Динамички модел трофазне кавезне асинхроне машине заснован на методи коначних елемената“, докторска дисертација, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2016.
- [3] Богдан М. Брковић, „Основи електромагнетског прорачуна обртних машина за наизменичну струју“, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет, Катедра за енергетске претвараче и погоне, Београд, 2023.
- [4] Веран Васић, „Увод у електричне машине“, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2023.
- [5] Radenko Wolf, „Основи електричних стројева“, Школска knjiga zagreb, Zagreb, 1989.
- [6] Нина Стефановић, „Енергетски трансформатори у сложенепериодичним режимима“, мастер рад, Факултет техничких наука, Нови Сад, 2020.

Кратка биографија:

Сергеј Стајић рођен је 2000. године у Сомбору. Факултет техничких наука уписао је школске 2019/2020. године. На студијама се определио за смер Електроенергетика – Енергетска електроника и електричне машине где је и дипломирао 2023. Године

Дејан Јеркан је ванредни професор на Факултету техничких наука у Новом Саду, на катедри за Енергетску електронику и претвараче. Област интересовања су му моделовање и дијагностика електричних машина као и метода коначних елемената.