

7. Каминский М.Л. Проверка и испытание электрических машин. М., «Энергия», 1977. 404 с. с ил. (Б-ка электромонтера. Вып. 462).
8. Муминов, М.У., Ш.Ю. Дархонова, и И.А. Усманиева. «Функции и условия эксплуатации гибких кабелей, используемых в горнодобывающей промышленности». *Таълим фидойлари* 19 (2022): 21-24.
9. Пешков И.Б., Уваров Е.И. Кабельная промышленность 100 лет в содружестве с энергетиками / XX век. // Электроэнергетика. М.: Мастер, 2003.
10. М.И. Семененко, Г.К. Хромова, Т.Ф. Кузина Электрическая прочность высоковольтных кабельных бумаг при постоянном, переменном и импульсном напряжениях. Электрическая промышленность. Серия Кабельная техника, 1970, № 8.
11. С.Е. Глейзер Электрическое поле при постоянном напряжении в маслonaполненных кабелях с градирующей изоляцией. Электротехническая промышленность. Серия Кабельная техника, 1975, № 7. Старший преподаватель кафедры электротехники и электромеханики
12. С.Д. Холодный, Э.Т. Ларина, В.М. Леонов Конструирование изоляции кабельных изделий. — М.: МЭИ, 1988 г.
13. Основы кабельной техники. Учебное пособие для вузов. Под. редакцией. В.А. Привизенцева. Издание 2-е, переработанное и дополненное. М.: 1975.
14. Muminov M.U., Lapasov H “Egiluvchan elektr kabellarning konstruktiv xususiyatlari va ishlatiladigan materiallar tahlili”. (2025). *Образование наука и инновационные идеи в мире*, 70(8), 420-426. <https://scientific-jl.com/obr/article/view/18801>.

Information about authors:

Pirmatov Nurali Berdiyrovich	— Professor, Department of Electrical Machines and Drives Engineering, Tashkent State Technical University; Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Street, 2, Republic of Uzbekistan ORCID: 0000-0001-5212-2593, e-mail: pirmatovnurali@gmail.com
Muminov Maxmudjon Umurzakovich	— Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Almalyk State Technical Institute, 110100, Almalyk city, Republic of Uzbekistan, M. Ulugbek street, 45. ORCID: 0009-0005-0865-6404, e-mail: muminov33355@mail.ru
Raykhonov Shuhrat Zaripovich	— Head of the Department of “Electrical Engineering and Electromechanics” of the Almalyk State Technical Institute, Associate Professor, 45 M. Ulugbek Street, Almalyk, 110100, Republic of Uzbekistan. ORCID: 0009-0004-5895-6758, e-mail: shuhratrayxonov1990@gmail.com
An Arthur Dmitriyevich	— Senior lecturer at the department of Electrical Engineering and Electromechanics, Almalyk State Technical Institute, 110100, Almalyk, M.Ulug‘bek 45 Str., Republic of Uzbekistan ORCID: 0009-0005-2763-9589, e-mail: arturan1993@mail.ru

НОАЁН ҚУТБЛИ СИНХРОН ГЕНЕРАТОРНИНГ ЎЗ-ЎЗИНИ ҚЎЗГАТИШ ЖАРАЁНИ ЗОНАЛАРИНИНГ ЧЕГАРАЛАРИНИ МАТЕМАТИК МОДЕЛЛАШТИРИШ

А.Е. Бекишев, У.Н. Бердиёров

Тошкент давлат техника университети, Тошкент, Ўзбекистон

Doi: 10.5281/zenodo.18093055

АННОТАЦИЯ

Ушбу мақолада ноаён қутбли синхрон генераторнинг ўз-ўзини қўзғатиш жараёни зоналарининг чегараларини математик моделлаштириш масаласи кўриб чиқилган. Маълумки синхрон генераторнинг ўз-ўзини қўзғатиш жараёни салбий ҳолат ҳисобланади, чунки кучланиш ва тоқларнинг қийматлари жуда катта бўлиши мумкин ва энг асосийси уларни бошқариб бўлмайди. Шу сабабли синхрон генераторнинг ўз-ўзини қўзғатиш жараёни зоналарининг чегараларини таҳлил қилиш эксплуатация жараёнида муҳим ҳисобланади.

КАЛИТ СЎЗЛАР

синхрон генератор, ўз-ўзини қўзғатиш жараёни, синхрон ва асинхрон ўз-ўзини қўзғатиш жараёни, математик моделлаштириш.

КИРИШ

Ўз-ўзини қўзғатиш - бу система элементлари ва генератор чулғамларида кучланиш ва тоқнинг

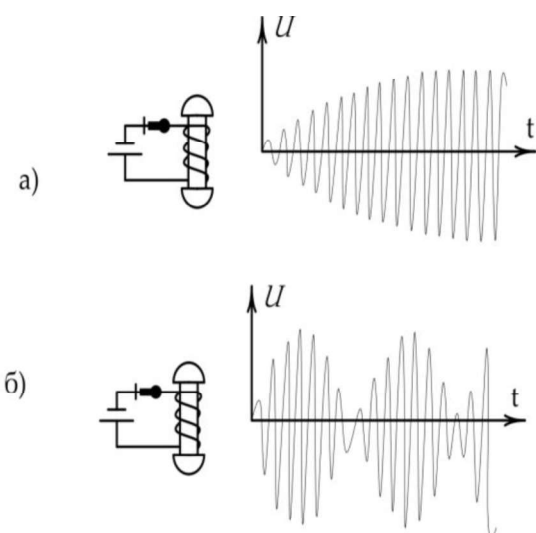
(U ва I) ўз-ўзидан ортиб кетиши билан характерланувчи электромагнит нотурғунликдир [1-8].

Ўз-ўзини қўзғатиш содир бўлишининг зарурий шарты статор занжирида машинанинг индуктив каршилиги билан тебраниш контурини вужудга келтирувчи уланган сифимнинг мавжуд бўлишидир. Машина чулғамларининг хусусий ва ўзаро каршиликлари ротор айланганда вақт давомида ўзгарувчанлиги сабабли контурда электр тебранишлар сўнмасдан, аксинча ортиб борувчи шароит юзага келиши мумкин. Бу ўз-ўзини қўзғатишни ифодалайди.

Синхрон генераторнинг ўз-ўзини қўзғатиш жараёни салбий ҳолат ҳисобланади, чунки кучланиш ва тоқларнинг қийматлари жуда катта бўлиши мумкин ва энг асосийси уларни бошқариб бўлмайди. Генераторлар шиналари ва системанинг тугун нукталарида кучланишнинг ўзгариш характери бўйича ўз-ўзини қўзғатиши синхрон ва асинхрон турларга бўлинади.

Агар тоқ ва кучланишнинг ортиб бориши нисбатан секин ва текис бўлса, у ҳолда ўз-ўзини қўзғатиш синхрон деб аталади (1,а- расм). Статор ва ротор магнит майдонларининг айланиш тезликлари бир хил. Синхрон ўз-ўзини қўзғатиш фақат аён кутбلى синхрон генераторларда юз бериши мумкин.

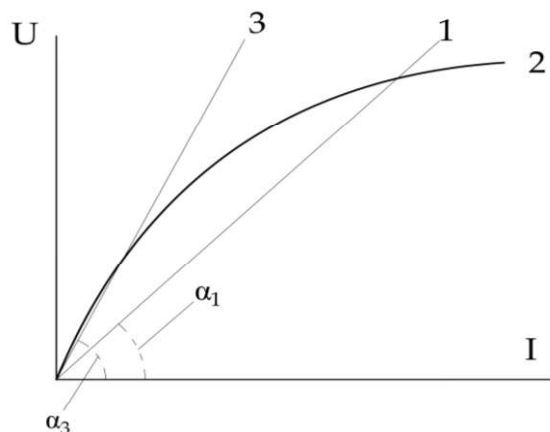
Агар тоқ ва кучланишнинг ортиб бориши тез ва узилишлар оркали бўлса, у ҳолда ўз-ўзини қўзғатиш асинхрон деб аталади (1,б- расм). Статор ва ротор магнит майдонларининг айланиш тезликлари хар хил бўлади. Асинхрон ўз-ўзини қўзғатиш аён ва аёнмас кутблы синхрон генераторларда юз бериши мумкин. Маълум шароитларда синхрон ва асинхрон ўз-ўзини қўзғатишлар бир вақтнинг ўзида содир бўлиши мумкин [1-8].



1-расм. Синхрон генераторнинг ўз-ўзини қўзғатиши: а) синхрон, б) асинхрон

АСОСИЙ ҚИСМ

Синхрон машинанинг синхрон ўз-ўзини қўзғатиши. Синхрон генератор ЭЮК генераторнинг салт ишлаш токига ва сифимдаги кучланишнинг токка боғланиш характеристикасини, яъни тармоқ характеристикасини қурамыз (2-расм) [1].



2- расм. Синхрон генератор ва тармоқнинг тавсифи: 1 - тармоқнинг тавсифи $U = X_s \cdot I$; 2 - генераторнинг салт ишлаш тавсифи x ; 3 - генераторнинг тўғриланган салт ишлаш тавсифи

Ўз-ўзини қўзғатиш ҳолати, яъни тоқ ва кучланишнинг узлуксиз ортиб бориши тармоқ характеристикаси (1) ва генераторнинг салт ишлаш характеристикаси (2) кесишган тақдирда бўлиши мумкин. Бошқача айтганимизда, ўз-ўзини қўзғатиш мавжуд бўлиши учун (1) характеристика салт ишлашнинг тўғри чизиқли характеристикасидан (салт ишлаш характеристикасига координаталар бошида ўтказилган уринмадан) пастда жойлашиши, яъни $\alpha_1 < \alpha_3$ бўлиши лозим. Сўнгги шарт қуйидаги тенгсизликка тўғри келади:

$$X_s < X_d. \quad (1)$$

Буни қуйидаги фикрлар асосида кўрсатиш мумкин. Салт ишлаш характеристикасидан қуйидагини ёзиш мумкин:

$$\Delta E / \Delta I = \operatorname{tg} \alpha_3. \quad (2)$$

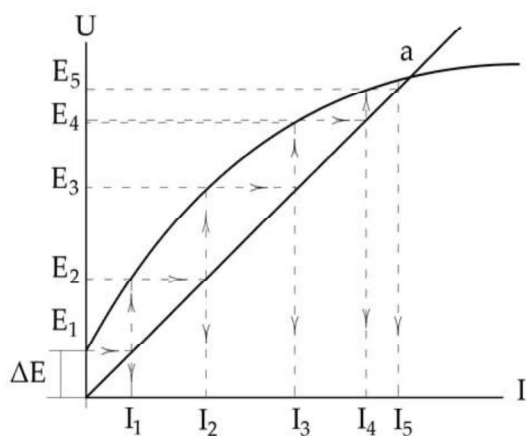
Шу билан бирга, бу тенгликнинг чап қисми салт ишлаш ҳолатига мос келувчи каршилиқни характерлайди, яъни биринчи яқинлашишда уни машинанинг бўйлама ўқ бўйича индуктив каршилиги X_d деб ҳисоблаш мумкин.

Бундай ҳолда (1) ни ҳисобга олиб, синхрон ўз-ўзини қўзғатишнинг пайдо бўлиш ва мавжуд бўлиш шартини ҳосил қиламиз:

$$X_q < X_c < X_d. \quad (3)$$

Ўз-ўзини қўзғатишнинг физик маъносини кўриб ўтаемиз. Маълумки, машинанинг индуктив қаршилиги статор токининг ўзгаришига нисбатан иккиланган частота билан ўзгаради ва шу сабабли, “статор-линия” блокада ёпик контур пайдо бўлиб, агар манба мавжуд бўлса, унда ток оқиб туради. Шунингдек, маълумки, ҳар қандай пўлат ўзак қолдиқ магнетизм ва мос ҳолда қолдиқ ЭЮК ΔE га эга. Ўз-ўзини қўзғатишнинг содир бўлишига ушбу қолдиқ ЭЮК туртки ҳисобланади.

Фараз қилайлик, генератор, линия, трансформатор индуктивликлари ва линия сифимидан ташкил топган статор контурида ЭЮК ΔE ҳисобига қиймат жихатидан катта бўлмаган ток пайдо бўлди. Ўз-ўзини қўзғатиш содир бўлишининг механизмини қискартирилган кўринишда қуйидаги схема бўйича тасвирлаш мумкин (3- расм) [1].



3- расм. Ўз-ўзини қўзғатишнинг содир бўлиш жараёни

Қолдиқ ЭЮК ΔE таъсирида ток I_1 пайдо бўлиб, у ЭЮК E_2 ни индукциялайди. Бу ЭЮК I_2 токнинг пайдо бўлишига олиб келади. Ток I_2 , ўз навбатида, ЭЮК E_3 ни ҳосил қилади ва жараён 1 ва 2 характеристикаларнинг кесишиш нуктасида барқарор ўз-ўзини қўзғатиш ҳолати ўрнатилмагунча давом этади.

Кўрилатган контурда ўсиб боровчи тебраниш содир бўлади ва кучланиш ортади. Шундай қилиб, юқорида келтирилганлардан ўз-ўзини қўзғатишнинг биринчи мезонини ҳосил қилиш мумкин:

$$X_d > X_s > X_q \quad (4)$$

Магнит нуктаи назаридан турбогенераторлар симметриклиги ($X_d = X_q$) ва ротор контурларининг ёпиклик шarti доимо бажарилганлиги (ротор массиви, демпфер системаси) сабабли уларда факат асинхрон ўз-ўзини қўзғатиш содир бўлиши мумкин.

Турбогенераторлар магнит симметрик машиналар сифатида синхрон ўз-ўзини қўзғатиш I зонасига эга эмас (4-расм).

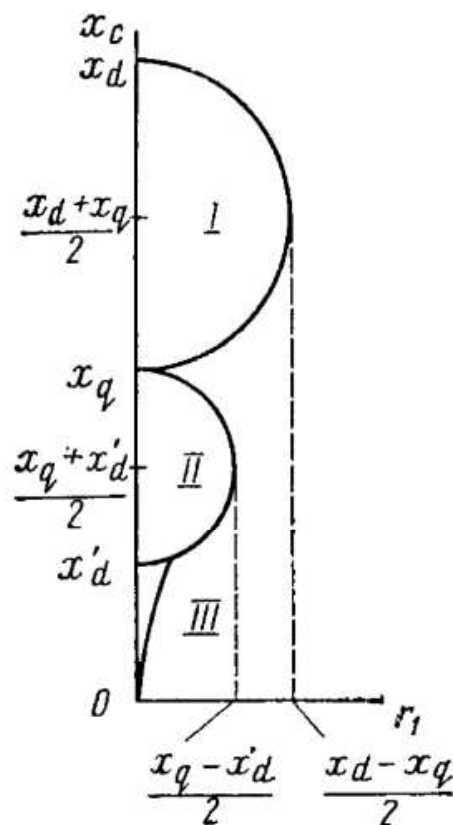
Турбогенераторнинг тўлиқ асинхрон ўз-ўзини қўзғатиш зонаси (II ва III) қуйидаги чегаралар доирасида жойлашган

$$0 < x_c < x_d, \quad (5)$$

Турбогенераторлар (ноаён кутбли синхрон генераторлар) қўзғатиш чулғамининг етар-лича катта ўзгармас вақт доимийсида r ва x_c координата ўқларидаги II асинхрон ўз-ўзини қўзғатиш зонаси тахминан, маркази ордината ўқида координаталар бошидан $(x_d + x'_d) / 2$ масофада жойлашган, радиуси эса $(x_d - x'_d) / 2$ га тенг бўлган ярим айлана билан ифодаланади.

Шундай қилиб, қабул қилинган тахминларга кўра белгиланган II зона чегарасига қуйидаги тенгсизликлар мос келади.

$$\left. \begin{aligned} x'_d < x_c < x_d, \\ 0 < r < (x_d - x'_d) / 2. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$



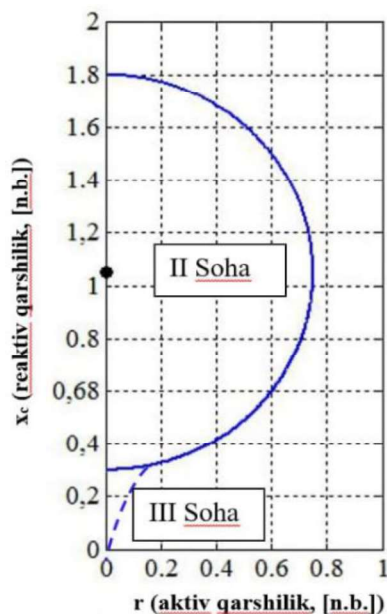
4-расм. Демпфер чулғами бўлмаган аён кутбли синхрон машинанинг ўз-ўзини қўзғатиш зонаси

Шуни ҳисобга олиш керакки, турбогенераторларнинг асинхрон ўз-ўзини қўзғатиш зонаси III, уларнинг кичик ва катта сирпанишларда етарлича катта асинхрон моментни ҳосил қилиш қобилияти туфайли, гидрогенераторларга қараганда анча кенгрокдир.

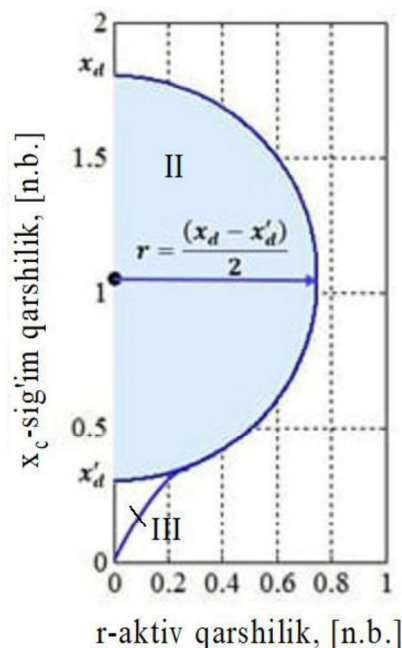
5-расмда номинал қуввати 3 кВА, номинал кучланиши 230 В, айланиш тезлиги 1500 айл/мин

бўлган ноаён кутбли синхрон генераторнинг тўлиқ асинхрон ўз-ўзини қўзғатиш зоналари (II ва III) кўрсатилган. Бу асинхрон ўз-ўзини қўзғатиш зоналари MATLAB дастури ёрдамида ҳисоблаб аниқланган.

6-расмда номинал қуввати 3 кВА, номинал кучланиши 230 В, айланиш тезлиги 1500 айл/мин бўлган икки ўқи бўйича қўзғатиладиган ноаён кутбли синхрон генераторнинг тўлиқ асинхрон ўз-ўзини қўзғатиш зоналари (II ва III) кўрсатилган. Бу асинхрон ўз-ўзини қўзғатиш зоналари MATLAB дастури ёрдамида ҳисоблаб аниқланган.



5-расм. Анъанавий ноаён кутбли синхрон генераторнинг репульсион-синхрон ўз-ўзини қўзғатиш соҳаси (II); асинхрон ўз-ўзини қўзғатиш соҳаси (III)



6-расм. Икки ўқи бўйича қўзғатиладиган ноаён кутбли синхрон генераторнинг репульсион-синхрон ўз-ўзини қўзғатиш соҳаси (II); асинхрон ўз-ўзини қўзғатиш соҳаси (III)

ХУЛОСА

5 ва 6 – расмларни такқослаш орқали қуйидаги хулосани бериш мумкин, яъни анъанавий турбогенераторларга нисбатан икки ўқи бўйича қўзғатиладиган турбогенераторларнинг асинхрон ўз-ўзини қўзғатиш зонаси III нисбатан кенгрок бўлиб, турбогенераторларнинг асинхрон ўз-ўзини қўзғатиш зонаси III, уларнинг кичик ва катта сирланишларда етарлича катта асинхрон моментни ҳосил қилиш қобилияти туфайли, гидрогенераторларга қараганда анча кенгрок бўлар экан.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАНИЦ ПРОЦЕССА САМОВОЗБУЖДЕНИЯ НЕЯВНОПОЛЮСНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

А.Е. Бекишев, У.Н. Бердиёров

Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассматривается вопрос математического моделирования границ зон процесса самовозбуждения неявнополусного синхронного генератора. Как известно, процесс самовозбуждения синхронного генератора является негативным состоянием, поскольку величины напряжений и токов могут быть очень большими, а главное, ими невозможно управлять. Поэтому анализ границ зон процесса самовозбуждения синхронного генератора имеет важное значение в процессе его эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

синхронный генератор, процесс самовозбуждения, синхронный и асинхронный процесс самовозбуждения, математическое моделирование.

MATHEMATICAL MODELING OF THE BOUNDARIES OF THE SELF-EXCITATION PROCESS OF A NON-POLED SYNCHRONOUS GENERATOR

A.E. Bekishev, U.N. Berdiyev

Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

ABSTRACT

This article considers the issue of mathematical modeling of the boundaries of the self-excitation process zones of a non-polarized synchronous generator. As is known, the self-excitation process of a synchronous generator is a negative state, since the values of voltages and currents can be very large, and most importantly, they cannot be controlled. Therefore, the analysis of the boundaries of the self-excitation process zones of a synchronous generator is important in the operation process.

KEYWORDS

synchronous generator, self-excitation process, synchronous and asynchronous self-excitation process, mathematical modeling.

ФЙДАЛАНИЛГАН АДАБИЁТЛАР

1. Электромеханик ўткинчи жараёнлар. //К. Р. Аллаев. Ўқув қўлланма. -Т.: “Молия” нашриёти, 2007 йил. 272 б.
2. Веников В.А., Анисимова Н.Д., Долгинов А.И., Федоров Д.А. Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах. –М.: Издательство «Высшая школа», 1964. -197 с.
3. Maroufian S., Pillay P. Self-excitation criteria of the synchronous reluctance generator in stand-alone mode of operation. 2016-12-01. pp. 1-5.
4. Кутарёв А.М. Специальный курс электрических машин. –Оренбург.: ГОУ ОГУ, 2008. -128 с.
5. Genadijs Zaleskis, Ivars Rankis, Marcis Prieditis. Self-Excitation System for Synchronous Generator. Electrical, Control and Communication Engineering 2013 / 4. Pp. 32-37.
6. Mounir N., Enany M., El-Said F. Dynamic operation of isolated self-excited synchronous generator under static loads. Journal of Electrical Systems, 17(3): 2021. pp. 310-323.
7. Fares Rebahi, Amar Bentounsi, Hocine Khelifa, Oussama Boulkhrachef, Djiaid Meherhera. Comparative study of a self-excited induction and synchronous reluctance generators capabilities. International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE), 19-21 November 2019. pp.1-5.
8. Antti-Juhani Nikkilä; Antti Kuusela; Minna Laasonen; Liisa Haarla; Arto Pahkin. Self-Excitation of a Synchronous Generator During Power System Restoration. Опубликовано в: IEEE Transactions on Power Systems Том: 34, Выпуск: 5, сентябрь 2019. pp. 3902-3911.

Information about authors:

- | | |
|----------------------------|---|
| Bekishev Allabergan | – Associate professor at the department of Electrical Machines and Electric Drive Engineering, Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan
ORCID: https://orcid.org/0000-000-3019-2050 , e-mail: allaberganbekisev@gmail.com |
| Berdiyev Ulugbek | – Assistant at the department of Electrical Power plants, Networks and Systems, Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5193-8661 , e-mail: berdiyev1811@gmail.com |