

Електронен коректор за възбуждане на синхронни генератори със система за компаундиране

Тодор Лазаров

Automatic voltage regulator of ships synchronous generators with compound excitation system: *This paper deals with field current control method of a synchronous generator for ships using a compound type electronic automatic voltage regulator (AVR) in order to control output voltage of the generator. An original AVR scheme, which uses proportional-integral-differential control and pulse-width modulation scheme to control the output voltage of the compound system, is presented. The scheme of this AVR and the results from its tests, which show good static and dynamic capabilities, is adduced and described.*

Key words: *ship's synchronous generator, automatic voltage regulator, compound excitation system, proportional-integral-differential regulator, width impulse modulation*

ВЪВЕДЕНИЕ

Към корабните системи за възбуждане на синхронните генератори се предявяват по-високи изисквания отколкото към промишлените. Причината е в ограничената мощност на корабните синхронни генератори, които са съизмерими с товара им. Те трябва да имат повишена експлоатационна надеждност, водозащитено изпълнение, изключителна точност и бързо действие. Освен това генераторите с автоматични системи за възбуждане трябва да изработват електроенергията в необходимото количество и съответното качество. В това влизат и поддържане на напрежението във всички режими и честотата в зададени допуски. Съгласно Българския Корабен Регистър се въвеждат следните изисквания:

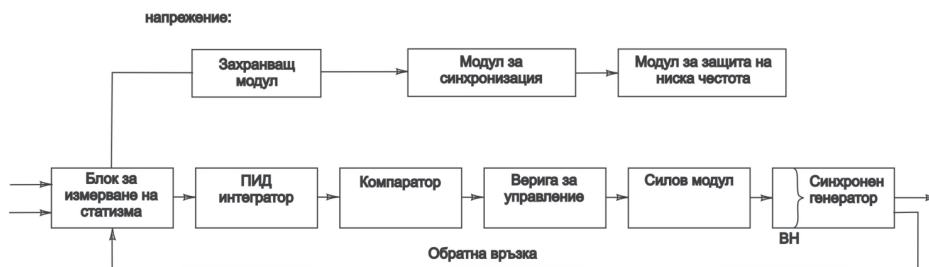
1. Напрежението трябва да се поддържа в допускателни рамки на $\pm 2,5\%$ от номиналното.
2. При преходни процеси, като включване и изключване на товар, напрежението на генератора трябва да се възстановява за време 1,5 сек. с отклонение до 3%.
3. Отклонението на синусоидата на напрежението не трябва да превишава 5%.
4. Разпределението на товара при паралелна работа на товара трябва да е в рамките на 10%.
5. При късо съединение системата за възбуждане на генератора трябва да издържа 3 пъти номиналния ток за време 2 сек.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Учебен синхронен генератор

Съгласно изискванията на Българския Корабен Регистър беше проектиран и реализиран регулатор на напрежение за учебен синхронен генератор тип SSG 5/2 IP22 – 5 kVA; $f = 50$ Hz; $U = 390/235$ V; $I = 7,4/4,5$ A; $n = 3000$ rpm; $U_f = 90$ V; $I_f = 3,8$ A; $R_a = 1,5$ Ω ; $R_f = 18,2$ Ω ; $X_a = 8,5$ mH; $X_f = 518$ mH; $x_d' = 0,17$ p.u.; $x_d'' = 0,12$ p.u.

Блоквата схема има вида:



Фиг.1. Блокова схема на коректор на напрежението

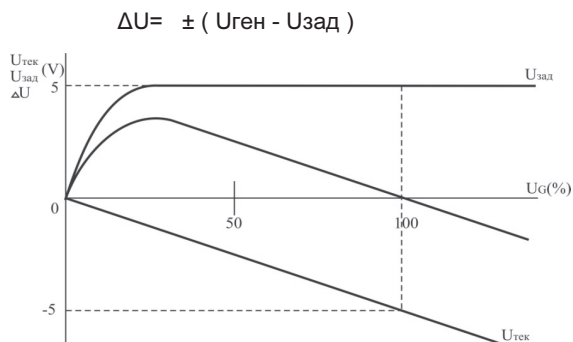
Състои се от:

- ЗМ- Захранващ Модул.

Осигурява захранване на всички модули от електронния коректор за напрежение. Напрежението от генератора постъпва на изправителния блок. Изправя се, изглажда се, стабилизира се и постъпва като захранващо напрежение на различните модули.

- БИС – Блок за Измерване и Статизъм.

Текущото генераторно напрежение постъпва на единия вход на блока $U_{ген}$, а на другия му вход постъпва сигнал, пропорционален на зададеното значение за напрежението - $U_{зад}$. Резултиращото напрежение е пропорционално на генераторното напрежение $U_{ген}$ и зададеното $U_{зад}$, като постъпва в ПИД интегратора.



Фиг.2. Графика за отношение на напреженията

- ПИД интегратор.

Модул за формиране закона за ПИД регулирането, съгласно който функционира регулаторът за напрежение и се изразява от следната формула:

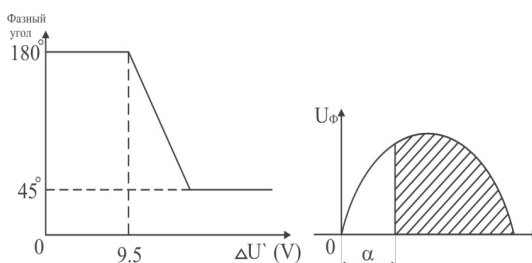
$$U = kU_{тек} + \frac{1}{T_i} \int dU_{тек} dt + T_d \frac{dU_{тек}}{dt} \quad (1)$$

Основната част е ОУ, който се явява ПИД усилвател. Отклонението на сигнала ΔU се усилва и тази усилена разлика $\Delta U'$ е пропорционална на интеграла на входното напрежение и постъпва в компаратора.

Компаратор. Това всъщност е електронна схема с аналогов вход и логически изход, т.е. на базата на постъпилото напрежение от ПИД интегратора той изработва импулси с определена продължителност и амплитуда /единица и нула/. Логическото състояние на изхода е индикация дали входното напрежение $U_{ген}$ е по-голямо от еталонното напрежение $U_{зад}$ или не. Задният фронт на изработения импулс управлява ъгълът на отпушване на тиристорите от силовия модул.

- СМ - Силов Модул.

Той е управляван от компаратора и сработва за определено време, в резултат на което подава по-голямо или по-малко захранващо напрежение на възбудителната намотка.



Фиг.3. Графика за отпушване на тиристора

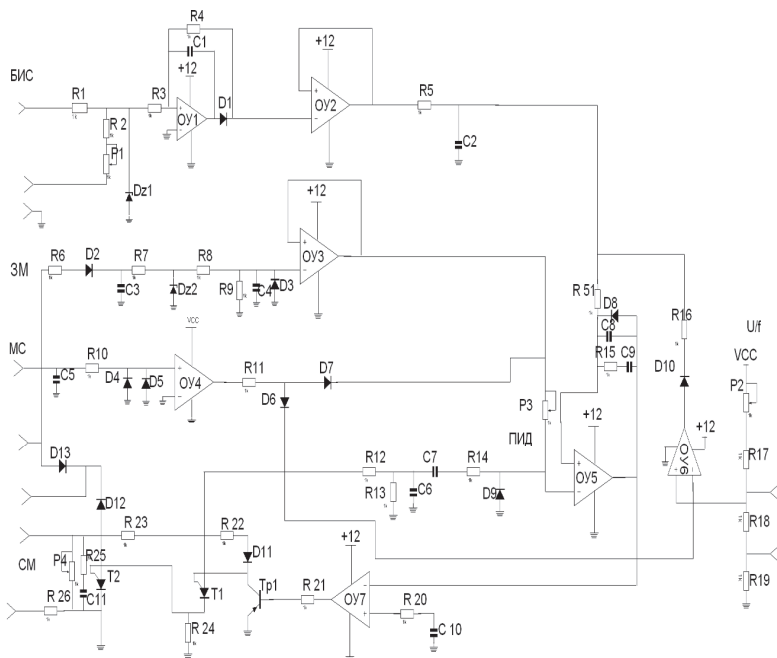
- МС – Модул за Синхронизация.

Представява функционален генератор, изработващ импулси, които с импулса, изработван от компаратора, управляват работата на силовия модул.

- Модул за защита по ниска честота U/f .

Изработва импулси, блокиращи силовия модул при ниска честота на въртене на генератора до 30 Hz, в резултат на което на възбудителната намотка не постъпва напрежение.

Реализираната практическа схема има вида:



Фиг. 4. Електрическа схема на регулатор за възбуждане на синхронни генератори

Принцип на работа на електронния регулатор

Регулаторът на напрежение получава директно от шините на генератора напрежение 220 V – между една от фазите и звездния център. От делител на напрежение постъпва на захранващия модул ОУ 3, стабилизира се, изглажда се и захранва всички модули.

Сигналът от реактивния ток, снет чрез измервателен трансформатор ТТрр2, който е включен в една от фазите на генератора и напрежението на генератора, снето от потенциометър R, включен между д ругите две фази, образуват общ сигнал. Векторната сума на резултантния сигнал постъпва на неинвертиращия вход на сумиращия интегратор ОУ 1 от БИС – блока за измерване и статизъм. Потенциометърът Р 1 изменя дълбочината на обратната връзка – регулира стръмността /статизма/ на генераторната характеристика. Сигналът се изглажда от пулсации и смущения в ОУ 1 и ОУ 2 и постъпва в ПИД интегратора ОУ 5 на неинвертиращия му вход. На инвертиращия вход на ОУ 5 постъпва стабилизирано напрежение от захранващия модул ОУ 3. Чрез потенциометъра Р 3 се въвежда сигнал за стабилност и се изменя генераторното напрежение от 380 до 460 V. ПИД интеграторът е генератор за линейно-изменящо се напрежение ГЛИН и формира закона на регулирането. Трионообразното напрежение постъпва в компаратора ОУ 7, който от аналогов сигнал изработва импулсен правоъгълен сигнал, пропорционален на разликата от генераторното напрежение Uген и зададеното еталонно напрежение Uзад.

Въведен е модул за синхронизация – МС – ОУ 4. Това е генератор на импулси, които синхронизират работата на компаратора ОУ 6, в резултат на което участват косвено в управлението на силовия модул СМ – тиристори Т 1 и Т 2. Модулът за синхронизация се задейства под сигнала на токовия трансформатор ТТрр2 и осигурява паралелната работа на няколко генератора.

Блокът за защита от ниска честота е генератор, изпълнен с ОУ 6. При честота на развъртане на генератора до 30 Hz изходните сигнали от генератора подтискат сигналите от БИС ОУ 2 и интеграторът ОУ 5 не сработва. Потенциометърът Р 2 регулира до каква честота генераторът да изработва подтискащи импулси. Над 30 Hz генераторът ОУ 6 не работи и ПИД интеграторът нормално започва да функционира.

Изходният сигнал от компаратора ОУ 7 задейства транзистор Тр1. От изхода на Тр1 сигналът постъпва в силовия модул СМ на управляващия тиристор Т 1, който от своя страна задейства силовия тиристор Т 2. Отпушването на тиристор Т 2 осигурява регулирано изправено напрежение на възбудителната роторна намотка ВН на синхронния генератор СГ. С цел защита на крайното стъпало – силовия тиристор Т 2 – от високоволтови импулси, са включени високоволтови диоди D12 и D13 обратно на възбудителната намотка и има защитна R – C верига - R25, C11, P4.

Регулировъчни потенциометри:

Р1 – дълбочината на ООВ

Р2 – нискочестотна защита

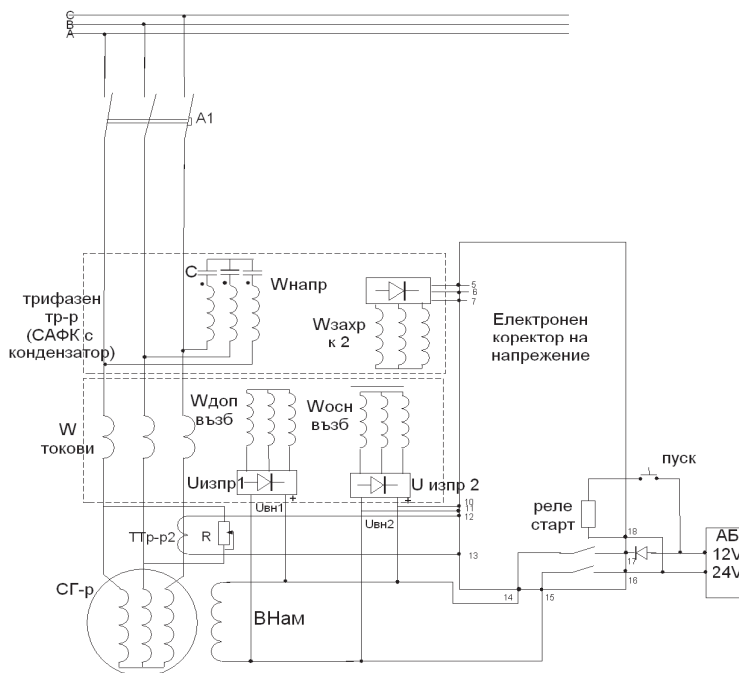
Р3 – сигнал за стабилност $U = 380 - 460 V$

Р 4 – ВЧ защита /разрядът на ВН е различен за различните СГ/

За да се подобри работата на генератора регулаторът беше изследван съвместно със САФК.

Принципът на работа е следният:

Компаундиращ трансформатор. Същият е предназначен да осигури основната част от тока на възбуждане в режим на празен ход, под товар и при късо съединение, като осигури селективна работа на защитата. За целта същият е изчислен да осигури траен ток на късо съединение не по-малък от . Трансформаторът е тринамотъчен с токова, напреженова и две вторични и Wдоп.възб. намотки. е с по 4 секционни настроечни изводи като в нея се компаундира (сумира) напрежение, пропорционално на натоварването на генератора и напрежението на неговите клеми. Трансформаторът се насища при токове през . При трансформаторът е ненаситен и вторичната намотка е източник на ток спрямо възбудителната намотка на генератора и не трябва да работи на празен ход.



Фиг.5. САФК с електронен коректор на напрежение

- Трансформаторът осигурява възбудането на генератора с точност $\pm 10\%$. Добавена е и допълнителна $W_{доп.възб}$ намотка с изправител, осигуряваща първоначалното възбудане на генератора. В случай, че генераторът не се възбуди е осигурено аварийно възбудане от акумулатор с кнопка и реле;

Компаундиращ елемент. В качеството на елемент, осигуряващ компаундирането е избрана кондензаторна батерия C , свързана последователно с напреженовата намотка на трансформатора W_H като я превръща в източник на ток спрямо възбудителната намотка. Така сигналите на KH и KT се сумират паралелно като токови източници.

За да има аритметично сумиране напреженовата намотка W_H се обтича от край към начало т.е. сменяме изводите на трансформатора и получаваме I_{f_0} .

Общият подмагнитващ ток е капацитивен. Схемата осъществява много лесно самовъзбудане на генератора.

- Изправител. В системата е избран изправител с компактна модулна конструкция схема Ларионов, свързан към вторичните намотки на трансформатора $W_{осн.възб}$ и $W_{доп.възб}$.

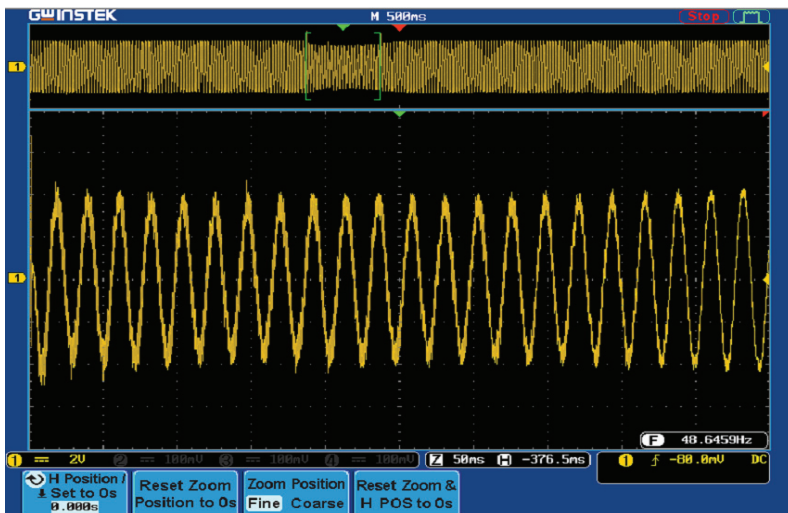
- Измервателен токов трансформатор TT_{p2} . Трансформаторът е включен в една от фазите на генератора и изходният му сигнал се сумира векторно с напрежението на генератора така, че се получава сигнал пропорционален на реактивния ток;

- Коректор на напрежение - измерва напрежението на генератора и сигнала от реактивния ток и регулира напрежението на възбудане така, че

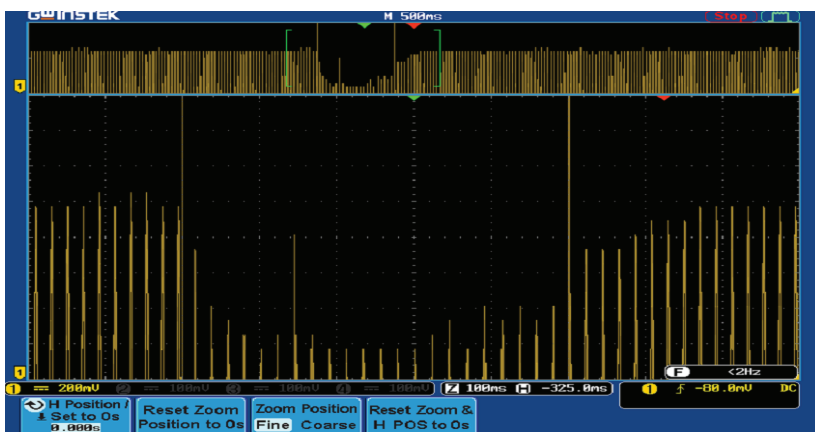
напрежението на генератора да се поддържа с точност не по-малко от 2% като се осигури статизъм (наклон на характеристиката) при реактивно натоварване в границата на споменатите 2%. Коректорът работи по широчинно-импулсен принцип, като регулира ширината на импулсите към крайния транзистор, като по този начин се регулира големината на възбудителния ток. В резултат на това се променя генераторното напрежение U ген. Резултатите от практическите изследвания са следните:

Таблица №1

| Изисквания към САРН | Система за възбуждане | + коректор напрежение |
|--|------------------------|-------------------------|
| 1. Поддържане напрежението $\pm 2,5$ % от U_n при изменение товара от нула до номинален при номинален $\cos \phi=0,8$. | 400V – 20V – 5 % | 400V – 1,5V – 0,3 % |
| 2. При претоварване 150 % в продължение на 2 мин. Точността на напрежението е ± 10 % от U_n при $\cos \phi=0,6$. | 400-40V 10% | 400-5V 2,5% |
| 3. Внезапно изменение на товара не трябва да променя $U_n +20$ %/- 15 %. След преходния процес напрежението на трансформатора трябва да се възстанови за $t \leq 1,5$ s в пределите на ± 3 % U_n . Може да се използва товар до 60% от номиналния ток. | $t = 0,8$ s 5% 40 V | $t < 0,25$ s 1% 15 V |
| 4. Отклонението на синусоидалната форма на напрежение не трябва да превишава 5 %. | 5% | Не превишава 1 % |
| 5. При късо съединение генераторът заедно със системата за възбуждане и автоматичния регулатор за $t = 2$ s, трябва да издържа ток $I_{к.с.} = 3 I_n$ | $I_{к.с.} = 4 I_n$ | $I_{к.с.} = 4 I_n$ |



Фиг. 6 Преходен процес – синусоида със собствен регулатор



Фиг.7 Продължителност на преходния процес със електронен блок – подобрен 5 пъти



Фиг.8 Ток на възбуждане при преходен процес с електронен регулатор 5 пъти по кратък във времето

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Схемата с коректор на напрежение повишава точността на поддържаното напрежение десет пъти, а при претоварване със 150 % нараства осем пъти.
2. При внезапно изменение на товара след преходния процес напрежението се възстановява за време по-малко от 0,25 сек. с точност 1 %.
3. Продължителността на преходния процес намалява три пъти ($t < 0,25s$), а по амплитуда 40%.
4. Отклонението на синусоидалната форма на напрежението не превишава 1 %.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Djagarov N., Lazarov T., Automatic voltage regulator for a ship's synchronous generator, Proceedings of Twelfth International Conference on Marine Science and Technologies, 25-27 September, 2014, Varna, Bulgaria, pp.132-137.
- [2] Djagarov N.F., Ship's Electrical Power Systems, Technical University of Varna, 1997, 324 p.
- [3] Български корабен регистър, Правила за класификация и строеж на морски кораби, част 7-15, 1986
- [4] Вълков, Ст., Аналогова електроника, Техника, 2002
- [5] Иванов, А. Ц.р Електрообзавеждане на кораба, част втора, Военно издателство, 1989
- [6] Конов, К., Импулсни схеми в радиолюбителската практика, Техника, 1981
- [7] Тауърс, Т., Транзистори, техника, 1999
- [8] Шишков, Ат., Полупроводникова техника, Деликом, 2000

За контакти: инж. Тодор Петров Лазаров, Катедра „Електротехника“, Висше военноморско училище „Никола Й. Вапцаров“, тел: 0886 135246, e-mail: todor_lazarov@yahoo.com

Докладът е рецензиран.