

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки
Кафедра електричної інженерії та електроніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

на тему:

**Модернізація суднової електроенергетичної установки при
використанні валогенераторної системи з технологією ШІМ**

Виконав: студент 6 курсу, групи 3601Бз
спеціальності:

271 – Морський та внутрішній водний транспорт
(шифр і назва спеціальності)

Спеціалізація: «Експлуатація суднового
електрообладнання і засобів автоматики»



Зверьков Денис Олексійович
(підпис, П.І.Б.)

Допущений до захисту 12.12.2025
(дата)

Завідувач кафедри Муха Микола Муха
(підпис, ім'я та прізвище)

Керівник Муха Микола Муха
(підпис, ім'я та прізвище)

Нормо контролер Шестака Анатолій Шестака
(підпис, ім'я та прізвище)

Рецензент Гвоздева Юліана Гвоздева
(підпис, ім'я та прізвище)

м. Одеса 2025 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»

Навчально-науковий інститут автоматики та електромеханіки

Кафедра електричної інженерії та електроніки

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедрою ЕІ та Е

 Микола МУХА
«17» 12 2025 р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи магістра

Звєрькова Дениса Олексійовича

Тема магістерської роботи

«Модернізація суднової електроенергетичної установки при використанні валогенераторної системи з технологією ШІМ» затверджена наказом ректора університету від 12 грудня 2025 р. за № 1514

1. Термін здачі курсантом закінченої роботи до 18.12.2025 р.
2. Вихідні дані до роботи: технічна документація судна контейнеровозу
3. Змістовна частина розділів дипломної роботи освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр» зі спеціальності 271 «Морський та внутрішній водний транспорт» освітньо-професійної програми «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики»:
 - 3.1. Аналітичний огляд науково-технічної літератури за предметом дослідження, аналіз методів дослідження суднової валогенераторної установки з синхронним генератором з постійними магнітами. Обґрунтування теми дослідження, її актуальності та новизни.
 - 3.2. Розробка математичної моделі елементів суднової ВГУ з ЧРЕП, обґрунтування допущень, оцінка адекватності моделей, розробка алгоритму проведення моделювання.

- 3.3. Проведення аналізу динамічних режимів ВГУ. Модель синхронного генератора з постійними магнітами, підтримуюча реалізацію різних алгоритмів управління.
- 3.4. Моделювання, аналіз та реалізація випрямляча Active front end.

Дата видачі завдання: 01.11.2025 р.

Керівник  Муха Микола

Завдання прийняв до виконання  Зверьков Денис

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітки
1.	Аналітичний огляд науково-технічної літератури за предметом дослідження, аналіз суднових валогенераторних систем. Обґрунтування теми дослідження, її актуальності та новизни.	01.11.25- 15.11.25	
2.	Розробка математичних моделей елементів валогенераторних систем, обґрунтування допущень, оцінка адекватності моделей, розробка алгоритму проведення моделювання.	16.11.25- 26.11.25	
3.	Проведення аналізу динамічних режимів валогенераторних систем.	27.11.25- 30.11.25	
7.	Огляд основних способів керування валогенераторної установки з PMSG	01.12.25- 01.12.25	
8	Оформлення дипломної роботи. Підготовка презентації доповіді.	16.12.25- 18.12.25	

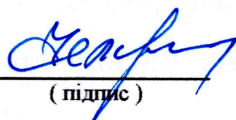
Курсант-дипломник


 (підпис)

Зверьков Денис

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


 (підпис)

Муха Микола

(прізвище та ініціали)

Анотація

Дипломна робота складається з 96 сторінок основного тексту та 21 посилань.

У дипломній роботі проведено аналіз суднових валогенераторних систем та їх режимів роботи виробництва ABB, їхні особливості на базі сучасної перетворювальної техніки, яка управляє роботою валогенераторної системи з регульованою частотою обертання головного двигуна судна. Визначені основні варіанти компоновки валогенераторних установок з метою модернізації суднових електроенергетичних систем.

Розроблена математична модель синхронного генератора на постійних магнітах та силового частотного перетворювача електроенергії з використання технічних засобів зменшення гармонік суднової мережі живлення.

Виконана енергетична оптимізація валогенераторної системи з PMSG та дослідження перехідних процесів при зміні навантаження та швидкості гребного валу судна на математичній моделі, що дозволило оцінити працездатність системи валогенератора при зміні частоти обертання валу та навантаження. Запропоноване керування AR дозволило оптимізувати систему валогенератора за рахунок зниження реактивної потужності в системі PMSG-AR. Реактивні струми i , відповідно, втрати в перетворювачі і машині можуть бути в кілька разів меншими при певному співвідношенні амплітуди і фази напруги (струму) на стороні змінного струму AR.

Ключові слова: СУДНОВА ВАЛОГЕНЕРАТОРНА СИСТЕМА, РТО РЕЖИМ, ШІМ, СИНХРОННИЙ ГЕНЕРАТОР З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

Abstract

The thesis consists of 96 pages of the main text and 21 references.

In the diploma work, the analysis of ship shaft generator systems and their operating modes manufactured by ABB, their features based on modern converter technology, which controls the operation of the shaft generator system with adjustable speed of rotation of the main engine of the vessel, is carried out. The main options for the layout of shaft generator sets for the purpose of modernization of ship electric power systems have been determined.

A mathematical model of a synchronous generator on permanent magnets and a power frequency converter of electricity using technical means of reducing harmonics of the ship's power supply network has been developed.

Energy optimization of the shaft generator system with PMSG and the study of transient processes when changing the load and speed of the ship's propeller shaft were performed on a mathematical model, which made it possible to assess the performance of the shaft generator system when changing the shaft speed and load. The proposed AR control made it possible to optimize the shaft generator system by reducing the reactive power in the PMSG-AR system. Reactive currents and, accordingly, losses in the converter and the machine can be several times less at a certain ratio of amplitude and phase of voltage (current) on the AC side AR.

Tags: SHIP SHAFT GENERATOR SYSTEM, PTO MODE, PWM, PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1. ЕНЕРГЕТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ СУДНОВОЇ ВАЛОГЕНЕРАТОРНОЇ СИСТЕМИ З СИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ PMSG).....	12
2. АНАЛІЗ СУДНОВИХ ВАЛОГЕНЕРАТОРНИХ СИСТЕМ.....	16
2.1. Особливості валогенераторних систем з ACS880MDLC.....	16
2.2. Аналіз режимів роботи.....	22
2.3. Переваги системи і приводу валогенератора.....	26
2.4. Проектування системи з використанням ACS880 MDLC.....	27
2.5. Типи SNC-перетворювачів.....	33
2.6. Типи перетворювачів обертових машин.....	34
2.7. Комутаційні шафи.....	43
2.8. Байпас.....	44
2.9. Типи машин.....	49
3. МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ PMSG).....	71
3.1. Математична модель генератора.....	71
3.2. Електромагнітні та енергетичні характеристики PMSG.....	73
3.3. Енергетичні характеристики оптимізованого валогенератора з PMSG..	76
3.4. Моделювання PMSG.....	77
4. МОДЕЛЮВАННЯ, АНАЛІЗ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ВИПРЯМЛЯЧА ACTIVE FRONT END.....	82
4.1. Моделювання випрямляча AFE.....	83
4.2. Керування AFE у двох варіантах.....	85
4.3. Спостереження за станом AFE.....	91
4.4. Оцінка надійності за функціями Ляпунова	93
ВИСНОВКИ.....	94
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	95

ВСТУП

Підвищення ефективності суднових електроенергетичних систем останнім часом здійснюється за рахунок використання потужності головних двигунів для виробництва електроенергії. Саме використання валогенераторних систем на суднах дозволяє знизити вартість електроенергії та експлуатаційні витрати. Одним із основних показників доцільності використання валогенераторних установок (ВГУ) у складі суднової електроенергетичної системи (СЕЕС) є зниження вартості електроенергії в середньому на 15÷20% [1, 2, 3].

Провідні суднобудівники вирішують проблему стабілізації частоти струму та напруги на валогенераторних установках різними способами. У цьому контексті на сучасних суднах використовуються різні типи валогенераторних установок, зокрема валогенераторні агрегати з асинхронним і синхронним генератором.

Роботи [1,2,4] передбачають формування пропозицій щодо модернізації вже діючих установок з метою оптимізації їхніх режимів роботи, розробку нового покоління ВГУ. Наведено опис основних типів ВГУ з постійною та змінною швидкістю обертання валогенератора (ВГ). Розглядаються основні методи стабілізації напруги та частоти, конструкція та принцип роботи ВГ, основні режими роботи ВГ з синхронним ВГ і напівпровідниковим перетворювачем.

На основі теоретичних та експериментальних досліджень вивчалися питання експлуатації ДЗП на суднах із ДЗП з змінною швидкістю обертання, а також можливість впровадження режиму руху цього типу.

Наразі на більшості сучасних суден встановлюються валогенераторні установки.

Як відомо, ВГУ використовуються як на суднах, де використовується гвинт з регульованим кроком (СРР) як рушійна установка, так і на суднах із гвинтом з фіксованим кроком. Валогенераторні установки на суднах із СРР є найпоширенішими на морському флоті. На суднах із СРР і валогенераторним агрегатом використовуються два методи керування головним двигуном:

1) керування головним двигуном відповідно до валогенераторної характеристики. У цій версії швидкість судна регулюється шляхом зміни кроку гвинта, при цьому швидкість обертання головного двигуна залишається сталою;

2) управління головним двигуном за комбінаторними характеристиками. У цій версії швидкість судна змінюється шляхом одночасного регулювання крокового співвідношення та швидкості обертання гвинта.

Комбінаторний метод керування є економічним, але в цьому випадку необхідно вимкнути ВГУ, оскільки частота виробленої електроенергії змінюється. Слід зазначити, що наразі ВГУ на судах з СРР працюють переважно з постійною швидкістю обертання. Вони простіші за конструкцією, мають високу ефективність і хорошу вагу та розміри. Однак ефективність силової установки все ще може бути підвищена, якщо при зменшенні навантаження на головний двигун одночасно змінюється кут обертання лопатей СРР, тобто зберігається оптимальне співвідношення швидкості обертання та кроку гвинта. При такому управлінні споживання палива та мастила зменшується, а економічний вплив на судна з СРР може зрости до 20% [4]. Для досягнення такого економічного ефекту на судах з СРР і ВГ необхідно стабілізувати частоту струму генератора валу (ВГ) при регулюванні швидкості обертання головного двигуна. Стабілізація частоти струму ВГ може здійснюватися за допомогою планетарних передач або напівпровідникових частотних перетворювачів (РР). Однак ці стабілізуючі елементи збільшують вагу та розміри ГУ, знижують її ефективність і ускладнюють обслуговування установки.

Останніми роками багато пишуть про доцільність використання валогенераторних установок на судах з синхронними генераторами СРР [2, 4 – 6].

Використання напівпровідникових частотних перетворювачів дозволяє розширити їхню функціональність і впровадити такі режими роботи: автономний генератор, генератор паралельно з допоміжними дизельними генераторами, автономний двигун, рух разом із головним двигуном. Традиційна конструкція установки включає синхронний валогенератор, частотний перетворювач.

Валогенератор є опцією для багатьох типів суден, особливо тих, що потребують більшої потужності для опалення або охолодження та для тривалих рейсів.

Вартість впровадження. Типовий валогенератор коштуватиме близько \$450 (USD) за кВт. Залежно від необхідної потужності та типу судна, оцінено, вартість впровадження становитиме від \$520,000 до \$3,500,000 (USD).

Потенціал відновлення. Найбільший потенціал зниження витрати палива та викидів є для валогенераторів із функціоналом РТО. Отже, валогенератор сприяє підтримці потужності головного двигуна і має здатність замінювати виробництво енергії допоміжними дизель-генераторами. Крім того, менші, але все ж значні скорочення можна очікувати для звичайних конфігурацій, де валогенератор виключно замінює допоміжну потужність ДГ.

Зниження викидів також залежатиме від типу встановленого обладнання. Якщо головний двигун — двотактний, а допоміжні — чотиритактні, зниження викидів потенційно значне, оскільки енергія для допоміжних цілей може генеруватися більш ефективним головним двигуном. Енергоефективність РТО має розглядатися в контексті гвинта та експлуатації судна. Якщо на судні є гвинт з регульованим кроком (СРР) і РТО без частотного перетворювача, вал має працювати на постійних обертах, щоб отримати необхідну мережеву частоту від вихідної потужності РТО (50 або 60 Гц). Коли судно рухається на нижчих швидкостях, гвинт потрібно повернути, щоб зменшити силу руху, оскільки оберти постійні. Це призводить до різниці тиску та кавітації, що знижує ефективність гвинта. Щоб уникнути цього, можна встановити РТО з частотним перетворювачем, щоб гребний вал не потребував роботи на постійних обертах і підвищував енергоефективність судна. Така система суттєво збільшує потенціал зменшення, одночасно з тим, як судно може легше встановлювати акумуляторні блоки та/або паливні елементи.

Загальне зниження викидів оцінюється на 1-5%.

Основні переваги PMSG порівняно з EESG такі:

- вища ефективність (у межах навантаження) (від 3 до 6% — залежно від навантаження [11]),

- легко отримати велику кількість пар полюсів, PMSG повільна швидкість) може встановлюватися без коробок передач (втрати від коробки передач — близько 2% [11]),

- менша вага та розміри,

- висока експлуатаційна надійність і проста конструкція,

- вища щільність потужності,

- низький рівень вібрацій.

1. ЕНЕРГЕТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ СУДНОВОЇ ВАЛОГЕНЕРАТОРНОЇ СИСТЕМИ З СИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ НА ПОСТІЙНИХ МАГНІТАХ (PMSG)

З розвитком силової електроніки використання валогенераторів у системах суднових електростанцій стає дедалі поширенішим. Використання синхронного генератора на постійних магнітах (PMSG) у цих системах замість поширеного електрично збудженого синхронного генератора (EESG) призводить до підвищення ефективності руху та надійності силової установки судна. Відсутність регулятора напруги в PMSG вимагає використання електронного перетворювача живлення для підтримки постійних параметрів напруги в мережі судна, що складається з активного випрямляча (AR) та активного мережевого інвертора (AI).

У роботі здійснено AR-тести в системі PMAG-AR, завдання якої — підтримувати постійну напругу в постійному колі при зміні швидкості та навантаження гребного валу, внаслідок чого вибір AI залишається простим вибором. Також було проведено енергетичну оптимізацію валогенераторної системи, що дозволяє зменшити втрати в AR та PMSG шляхом обмеження реактивної потужності в системі PMSG-AR, що особливо важливо для високо потужних електростанцій.

Енергетична установка судна є найважливішою системою на судні, що визначає правильну роботу інших систем. Економічне виробництво електроенергії є важливим для економіки експлуатації суден.

Валогенератори (SG) використовуються вже давно, оскільки вони можуть виробляти електроенергію, що покриває енергетичні потреби всього судна. Використання валогенератора дозволяє використовувати резервну потужність головного двигуна судна і тому є найекономічнішою системою генерації електроенергії на борту, при цьому відмовляючись від роботи дизельних генераторів (DG).

Головна проблема змінної швидкості гребного валу та змінного навантаження головного двигуна (ГД) вирішується завдяки розвитку силових електронних пристроїв. Основні переваги використання валогенераторів судна можна представити наступним чином:

- виробництво електроенергії за допомогою валогенератора зменшує забруднення повітря, на відміну від інших традиційних методів виробництва енергії на судні (наприклад, DG). Рівень шуму та вібрацій також зменшується;

- використання SG для виробництва електроенергії є більш економічним, оскільки не потребує дорогого пального, оскільки головний двигун здебільшого живиться залишковим паливом;

- питома витрата палива (SFOC) для повільно працюючих двигунів (головний двигун - ME) нижча, ніж для середньо обертових двигунів (DG), а робоча точка для повільно працюючих двигунів розташована близько до мінімальної характеристики $SFOC = f(\text{Навантаження})$ (рис. 1.1). [18];

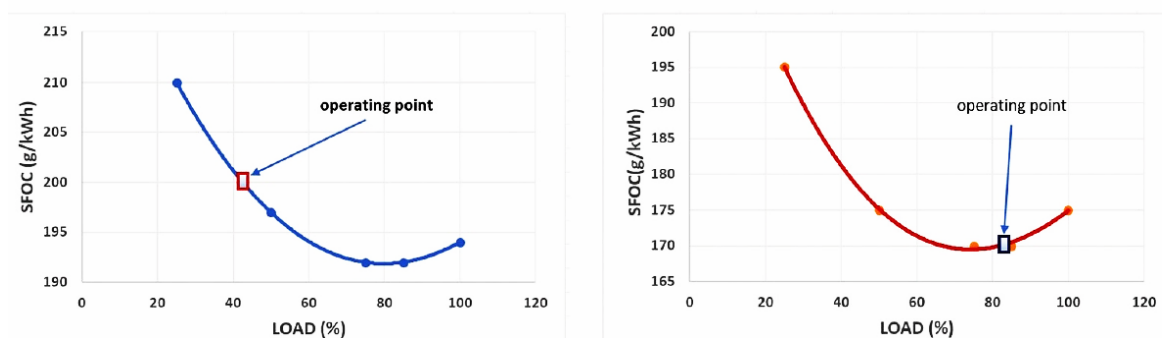


Рис. 1.1 – SFOC з навантаження DG (a) та ME+SG (b)

- ступінь зношення і, відповідно, ремонт обслуговування зменшується для SG;
- вартість запчастин і витрати на робочі години низькі, оскільки період обслуговування графіка SG має більший часовий інтервал порівняно з DG;
- витрати на встановлення генератора на валі також низькі, оскільки вони не потребують окремого фундаменту чи вихлопної системи;
- час встановлення для SG коротший;
- низькі запасні частини та витрати на людино-годину, оскільки період обслуговування графіка SG має більший інтервал часу порівняно з DG, - розвиток

машинобудування та розвиток напівпровідникових технологій дозволили інженерам підвищити ефективність руху корабля, використовуючи генератор з PMSG замість поширеного EESG.

Розробки в машинобудуванні та напівпровідникових технологій дозволили інженерам підвищити ефективність руху корабля, використовуючи валогенератор з PMSG замість широко використовуваного EESG.

Основні переваги PMSG порівняно з EESG такі:

- вища ефективність (у межах діапазону навантаження) (від 3 до 6% — залежно від навантаження [11]),
- легко отримати велику кількість пар полюсів, PMSG повільна швидкість) може встановлюватися без коробок передач (втрати від коробки передач — близько 2% [11]),
- менша вага та розміри,
- висока експлуатаційна надійність і проста конструкція,
- вища щільність потужності,
- низький рівень вібрацій.

Для усунення проблем із підтримкою постійних параметрів напруги, що генерується PMSG при зміні швидкості та навантаження гребного валу, необхідно використовувати потужні електронні перетворювачі енергії.

На рисунку 2 показано функціональну схему валогенераторної системи систему з PMSG, де такі позначення:

- ME - Головний двигун,
- PMSG — Постійний магнітний синхронний генератор,
- AR — активний випрямляч,
- ARC — це активна система керування випрямлячем,
- C - конденсатор постійного струму.

Валогенератори з синхронними машинами на постійних магнітах широко використовуються при будівництві електростанцій для автономних об'єктів у

гібридних транспортних засобах, вітрових турбінах, літаках і суднових установках [2, 4, 15, 16].

У цій роботі вирішується завдання модернізації суднової електроенергетичної установки контейнеровоза шляхом використання валогенераторної системи з частотно-керованим приводом та технологією ШІМ, що містить PMSG та активний випрямляч (AR). Ця система дозволяє побудувати стабільну суднову мережу живлення, в якій напруга електростанції підтримується AR. Відповідне керування AR дозволяє підтримувати сталу напругу в постійному колі перетворювача енергії разом зі зміною швидкості та навантаження головного двигуна і відповідно гребного валу SG (у визначених межах) [6]. Тому, керування мережевим інвертором відоме і просте у реалізації.

Об'єктом дослідження даної магістерської роботи є суднова валогенераторна система з синхронним генератором на постійних магнітах та потужним частотно-регульованим приводом.

Предметом дослідження є динамічні режими суднової валогенераторної системи з синхронним генератором на постійних магнітах та потужним частотно-регульованим приводом.

Метою роботи є розробка та дослідження моделей динамічних режимів валогенераторної системи та її елементів.

Для досягнення мети в роботі потрібно вирішити **наступні завдання**:

1. Аналіз суднових валогенераторних систем.
2. Розробка математичної моделі суднової валогенераторної системи з синхронним генератором на постійних магнітах та керованого перетворювача електроенергії.
3. Моделювання, аналіз та реалізація випрямляча Active front end.
4. Енергетична оптимізація суднової валогенераторної системи з синхронним генератором на постійних магнітах.

2. АНАЛІЗ СУДНОВИХ ВАЛОГЕНЕРАТОРНИХ СИСТЕМ

2.1. Особливості валогенераторних систем з ACS880MDLC

В цій роботі аналізуються валогенераторні установки виробництва ABB, їхні особливості на базі сучасної перетворювальної техніки, яка управляє роботою валогенераторної системи з регульованою частотою обертання головного двигуна судна.

Прийняті скорочення наступні:

AVR	–	Автоматичний Регулятор напруги
BAMU	–	Допоміжний вимірювальний блок
BCU	–	Плата блоку управління
CPP	–	Гребний гвинт з регульованим кроком
DC	–	постійний струм
DSU	–	Діодний блок живлення
DTC	–	Пряме регулювання крутного моменту
<i>emf</i>	–	електрорушійна сила
EXU	–	Блок збудження
HFO	–	Важке паливо
IGBT	–	Біполярний транзистор з IGBT–ізоляцією
IM	–	Індукційна машина
INU	–	Інверторний блок
ISU	–	блок живлення IGBT
LCU	–	Блок рідинного охолодження
OGC	–	Оптимальне керування мережею
OGC(ISU)–		керована OGC ISU
PM	–	Машина з постійними магнітами
PTH	–	Режим повернення додому
PTI	–	Споживання потужності
PTO	–	Відбір потужності
PS	–	Джерело живлення
RMC	–	Перетворювач обертових машин

RMS	–	Середньоквадратичне значення
RPM	–	Оборот на хвилину
SGD	–	Привід валогенератора
SM	–	Синхронна машина
SNC	–	Судновий мережевий перетворювач
STO	–	Безпечне відключення крутного моменту
U_{DC}	–	Напруга постійного струму DSU
$U_{DC,trip}$	–	відключення ISU при зниженій напрузі
U_{gen}	–	Напруга генератора
U_{grid}	–	Напруга постійного струму суднової мережі
U_N	–	номінальна напруга перетворювача
VFD	–	Частотно - регульований привід
VSSG	–	Валогенератор з регульованою частотою обертання

Визначення, які вживаються в даній роботі.

- Валогенератор з регульованою частотою обертання (VSSG) - це генератор, що приводиться в дію головним двигуном для вироблення електроенергії.
- Привод валогенератора (SGD) - це перетворювальна система, яка управляє роботою валогенератора з регульованою частотою обертання.
- Блок живлення IGBT (ISU) являє собою чотири-квадрантний Active front-end перетворювач, призначений для подачі енергії з трифазної мережі в ланцюг постійного струму перетворювача.
- Перетворювач обертових машин (RMC) - це перетворювач частоти, який використовується в якості приводу електричної машини.
- Судновий мережевий перетворювач (SNC) - це перетворювач, який використовується для електропостачання і в якості пристрою керування судновою мережею.

- Режим повернення додому (РТН) - це робочий режим, при якому валовий генератор працює як двигун і замінює основний двигун в якості основної силової установки.
- Відбір потужності (РТО) - це режим роботи, при якому VSSG працює паралельно з іншими допоміжними генераторами та іншими джерелами живлення.
- Споживання потужності (РТІ) - це режим роботи, при якому валовий генератор працює як електродвигун, підвищуючи потужність основного двигуна.
- Режим маневрування - це режим роботи, при якому SNC використовується в якості перетворювача частоти для керування приводом двигуна підрулюючого пристрою.
- Підключення від берега до судна означає, що судова мережа підключена до мережі порту або безпосередньо, або через перетворювач (перетворювачі).
- Скалярне управління - це метод управління двигуном перетворювача частоти, при якому напруга двигуна прямо пропорційна частоті ($U/f = \text{const}$) і привод управляється за допомогою опорного значення швидкості або частоти.
- DTC (Пряме регулювання крутного моменту) - це вдосконалений метод управління двигуном на основі моделі, при якому перетворювач частоти керує окремо крутний момент і потік двигуна.
- Електромережа - це електрична трифазна мережа змінного струму на судні, яка з'єднує навантаження з генераторами і валогенератором.

Система валогенератора

У цій главі представлені основні концепції та термінологія валогенераторних систем з регульованою частотою обертання. Реалізація VSD (приводу з регульованою частотою обертання) для валогенератора в лінійці продуктів ACS 880 multidrive детально описана в [2].

Валогенератор - це генератор, встановлений на лінії приводного валу або безпосередньо, або через коробку передач і приводиться в рух головним двигуном для вироблення електроенергії. Валогенератор з регульованою частотою обертання (VSSG) - це валогенератор, підключений до приводу з регульованою частотою обертання. Він дозволяє виробляти електроенергію незалежно від швидкості обертання гребного валу. Основною функцією VSSG є подача електроенергії в суднову мережу.

Система валогенератора складається з електричної машини, блоку управління і SGD. Система валогенератора також може бути оснащена приводним трансформатором, автоматичними вимикачами та підрулюючими двигунами. У звичайних електроприводах управління перетворювачем двигуна і мережевим перетворювачем відрізняється один від одного, і їх місце в системі приводу очевидно. Однак у випадку приводів від валогенераторів ситуація складніша. У певних конфігураціях може використовуватися трансмісія з двома мережевими перетворювачами або навіть з двома моторними перетворювачами без будь-якого мережного перетворювача, як буде розглянуто пізніше. Щоб не заплутатися, в цьому розділі перетворювач, підключений до електричної машини, називається перетворювачем обертових машин (RMC). Відповідно, перетворювач, підключений до суднової мережі через фільтр LCL, називається перетворювачем суднової мережі (SNC). Подання базової конфігурації системи валового генератора показано на рис.1.

Залежно від робочого стану валогенератора перетворювачі RMC і SNC можуть використовуватися або як інверторний блок (INU), або як блок живлення IGBT (ISU). Вибір і тип перетворювачів залежать від типу електричної машини,

що використовується в якості валогенератора, і умов, в яких працює система. Детальну інформацію по цьому процесу можна знайти в [2].

Установка валогенератора

Валогенератор може бути встановлений на судні одним з трьох способів, залежно від доступного простору. Типові способи установки показано пунктирними лініями на рис. 2. Перший спосіб установки (**a** на рис. 2) спрямований на встановлення на валу. Валогенератор встановлюється безпосередньо на вал, окремо від головного двигуна. Ротор є частиною валопроводу, а статор встановлюється окремо. При такому способі установки частота обертання двигуна, валу генератора і гвинта однакові. Цей метод зазвичай використовується з двигунами з низькою частотою обертання.

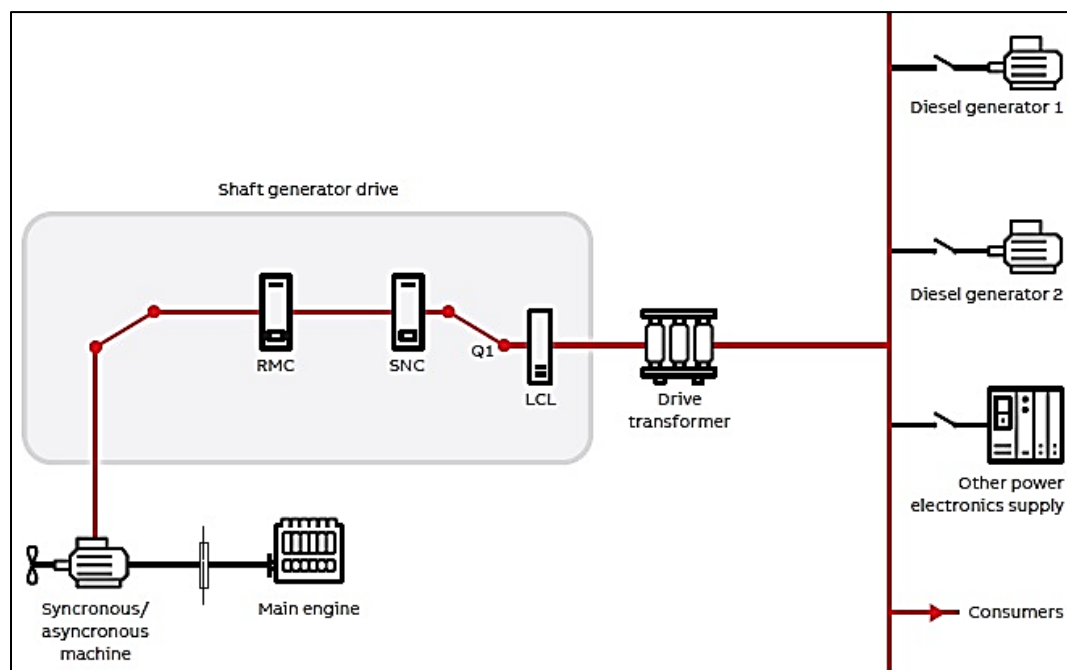


Рис. 1 - Базова система валогенератора і привода валогенератора (SGD)

Другий спосіб установки - за допомогою редуктора (**b** на рис. 2). У разі, якщо потрібне співвідношення між частотою обертання головного двигуна і частотою обертання головного, валогенератор може бути встановлений з коробкою передач. При установці такого типу оберти двигуна, валу генератора і гребного гвинта можуть відрізнятися в залежності від передавального відношення редуктора. Вал генератора в даному випадку зазвичай призначений для застосування на середніх обертах.

Третій спосіб установки - на вільному кінці двигуна (с на малюнку 2). Валогенератор може бути встановлений на вільному кінці головного двигуна з редуктором або без. Тут частота обертання валу генератора дорівнює частоті обертання двигуна. Це рішення могло б також включати в себе редуктор між двигуном і гвинтом.

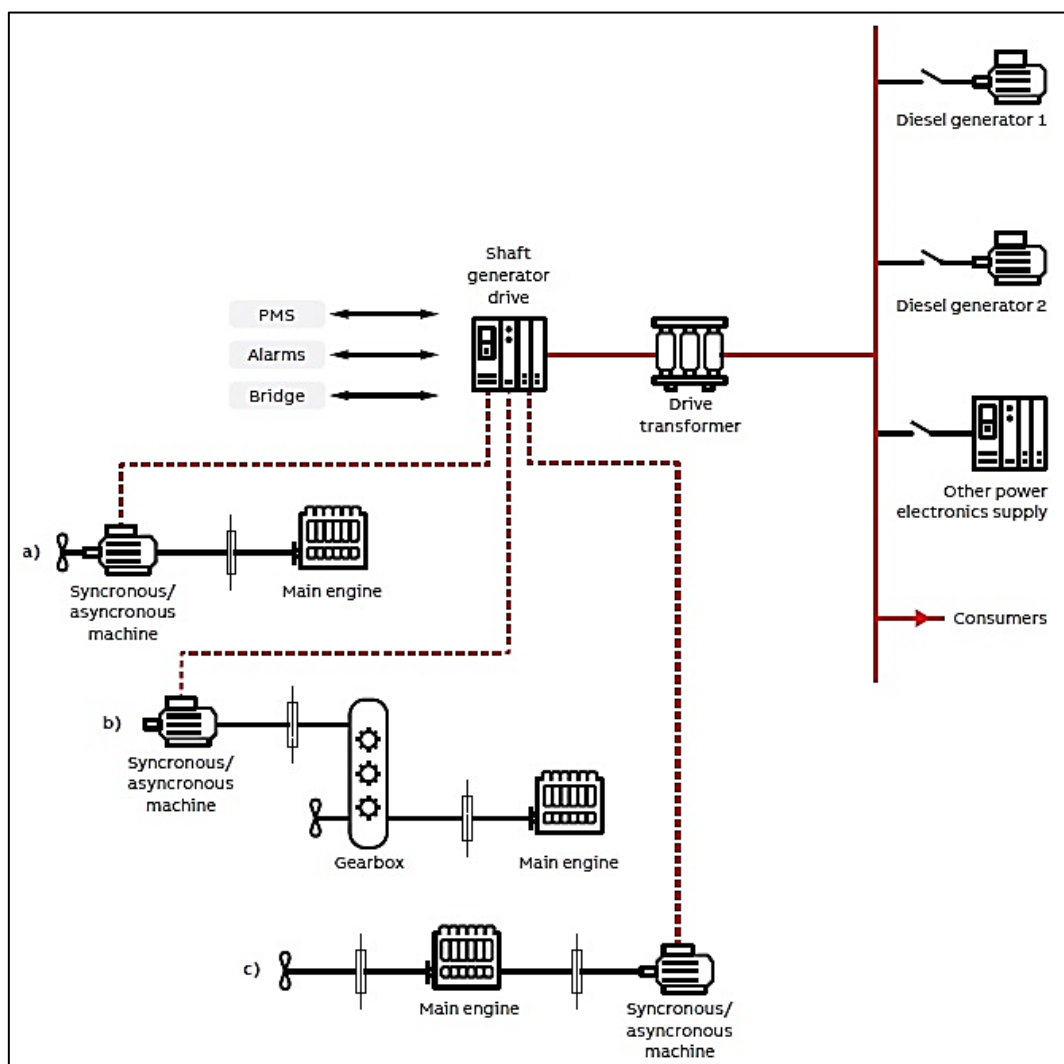


Рис. 2 - Способи установки генератора на вал: а) безпосередньо на вал, б) через редуктор, в) з вільної сторони двигуна

2.2. Аналіз режимів роботи

У цьому розділі представлені режими роботи приводної системи VSSG. Доступні режими залежать від обраної конфігурації обладнання. Привод валогенератора може працювати в різних режимах, кожен з яких забезпечує нові функціональні можливості, що впливають на експлуатацію судна і пов'язані з цим витрати:

- Power Take Off (PTO) забезпечує подачу електроенергії на головну шину або в автономному режимі, або паралельно з іншими джерелами живлення.
- Power Take In (PTI) валогенератор перетворюється в електродвигун для підвищення продуктивності головного двигуна.
- У режимі маневрування валогенератор подає енергію на підрулюючі пристрої.
- У режимі PTH валогенератор діє як рушійна сила для приведення в рух, у той час як головний двигун від'єднаний від валу.
- SGD також може функціонувати як перетворювач для підключення берегової електромережі. SGD використовує контроль падіння для регулювання напруги та частоти при паралельній роботі з іншими генераторами. Він також може компенсувати незбалансовані навантаження в мережі і забезпечити компенсацію реактивної потужності.

Відбір потужності (PTO)

В режимі ВІДБОРУ потужності енергія береться від механічного обертання валу, який приводить у рух гвинти. Активна потужність, необхідна для роботи мережі, виробляється головним двигуном.

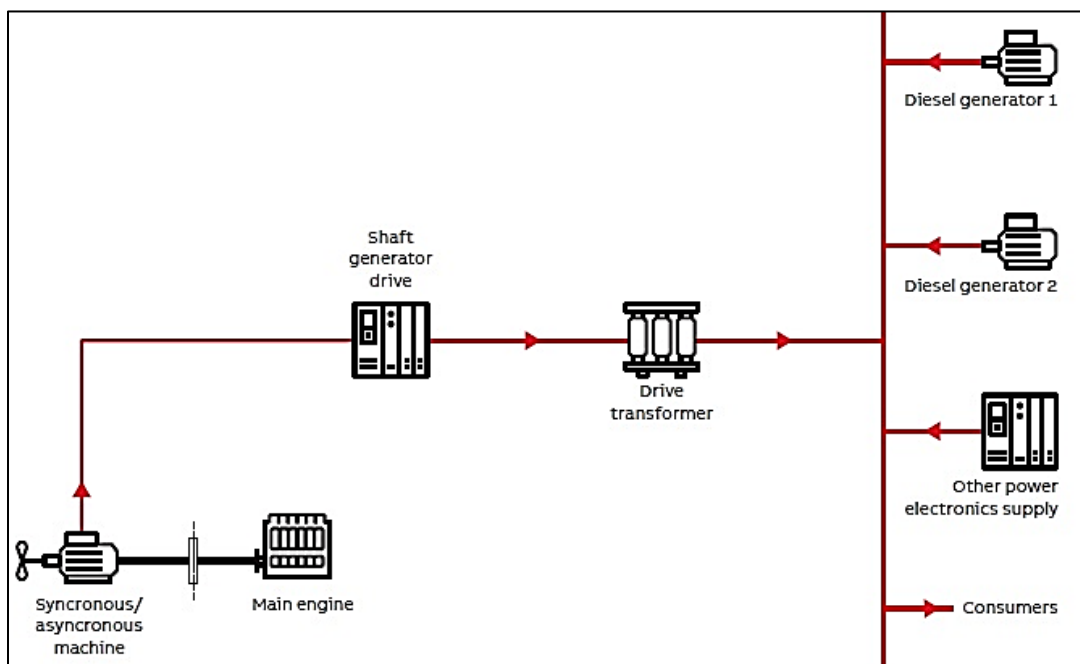


Рис. 3 – Система відбору потужності (PTO)

Споживання потужності (PTI)

В режимі PTI валогенератор функціонує як двигун. Він працює в парі з основним рушієм, і в сукупності вони забезпечують більш високу потужність, ніж може забезпечити основний двигун сам по собі. Потужність береться від допоміжних генераторів або накопичувачів енергії, і SGD приводить в дію двигун. Це забезпечує роботу головного двигуна за рахунок наявної електроенергії. Цей режим використовується при пікових потребах в потужності, таких як ламання льоду або буксирування в режимі максимальної тяги.

Така конфігурація часто допускає використання головного двигуна меншого розміру, оптимізованого для повсякденної експлуатації, із запасом потужності «у найгіршому випадку» в генераторі / двигуні з електричним валом.

Режим маневрування

В режимі маневрування валогенератор подає живлення на носові підрулюючі пристрої через привід із змінною швидкістю. Перетворювач SNC приводиться в дію за допомогою системи управління двигуном SW. Перетворювач RMC може працювати з системою управління двигуном або з системою управління мережею. Використання такого розташування може заощадити простір, вагу та гроші,

оскільки не потрібен додатковий перетворювач частоти з відповідним блоком розподільного пристрою.

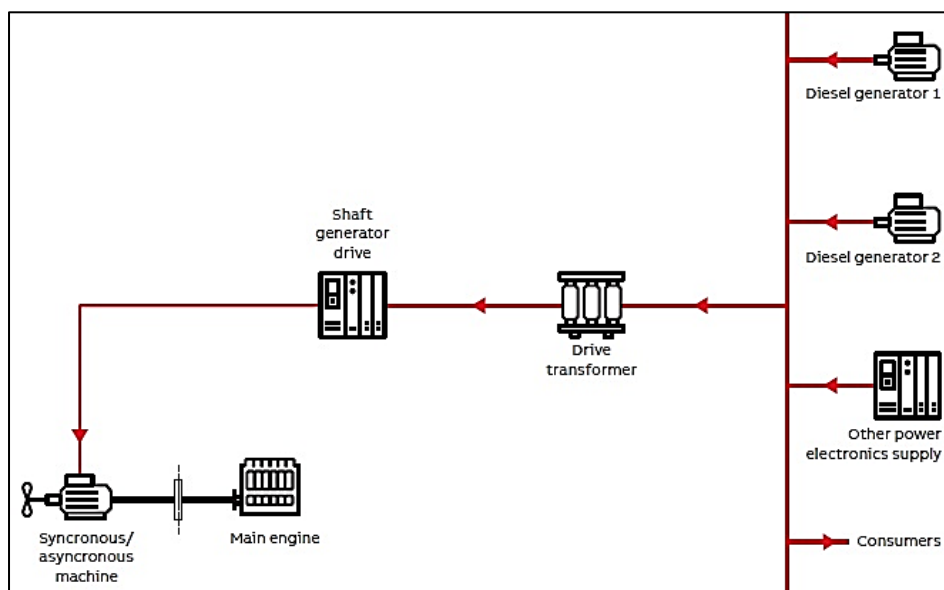


Рис. 4 – Споживана потужність (PTI)

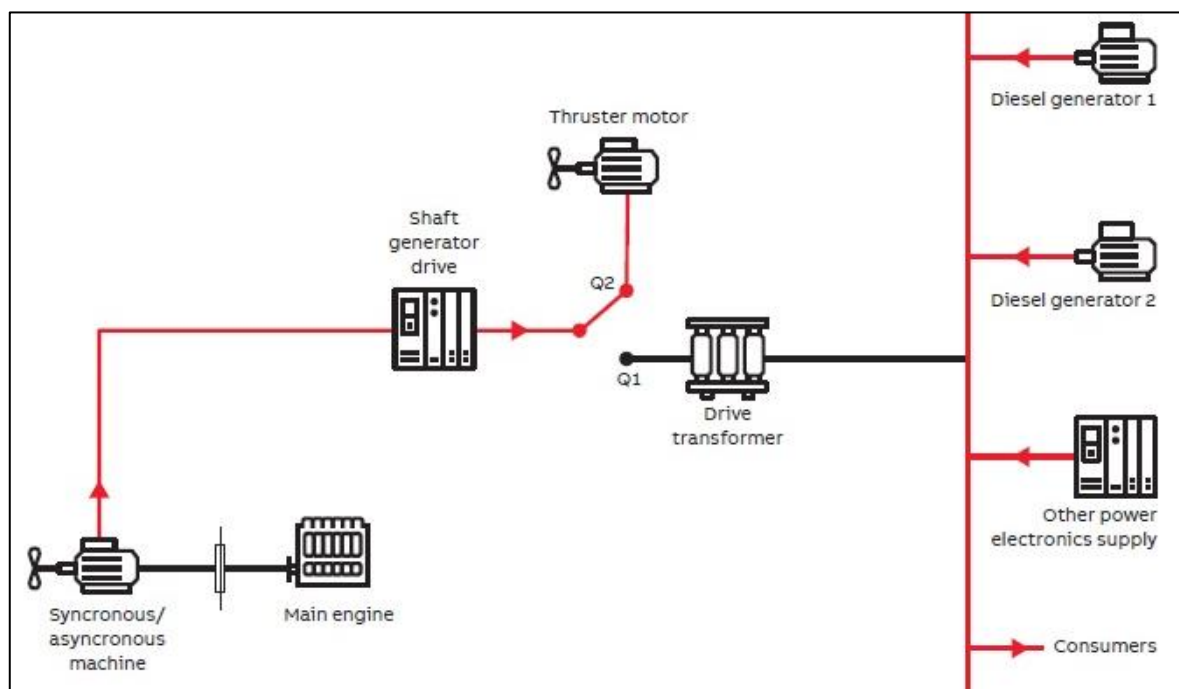


Рис. 5 – Режим маневрування

Режим повернення додому (РТН)

В режимі РТН валогенератор може використовуватися в якості альтернативи головного двигуна, якщо головний двигун можна від'єднати від магістралі валу. Потім енергія береться від допоміжних генераторів. SGD приводить в дію валогенератор / двигун з допомогою силової установки.

Цей режим використовується в якості аварійної системи у випадку відмови головного двигуна. Це також може бути дуже ефективно при операціях, де потрібна обмежена потужність двигуна замість роботи головного двигуна при дуже низькому навантаженні (наприклад, коли використання HFO в якості палива неможливо з екологічних причин і головний двигун повинен бути відключений).

Потужність, доступна для цього режиму, менше номінальної, тому потужність також обмежена порівняно зі звичайним режимом роботи.

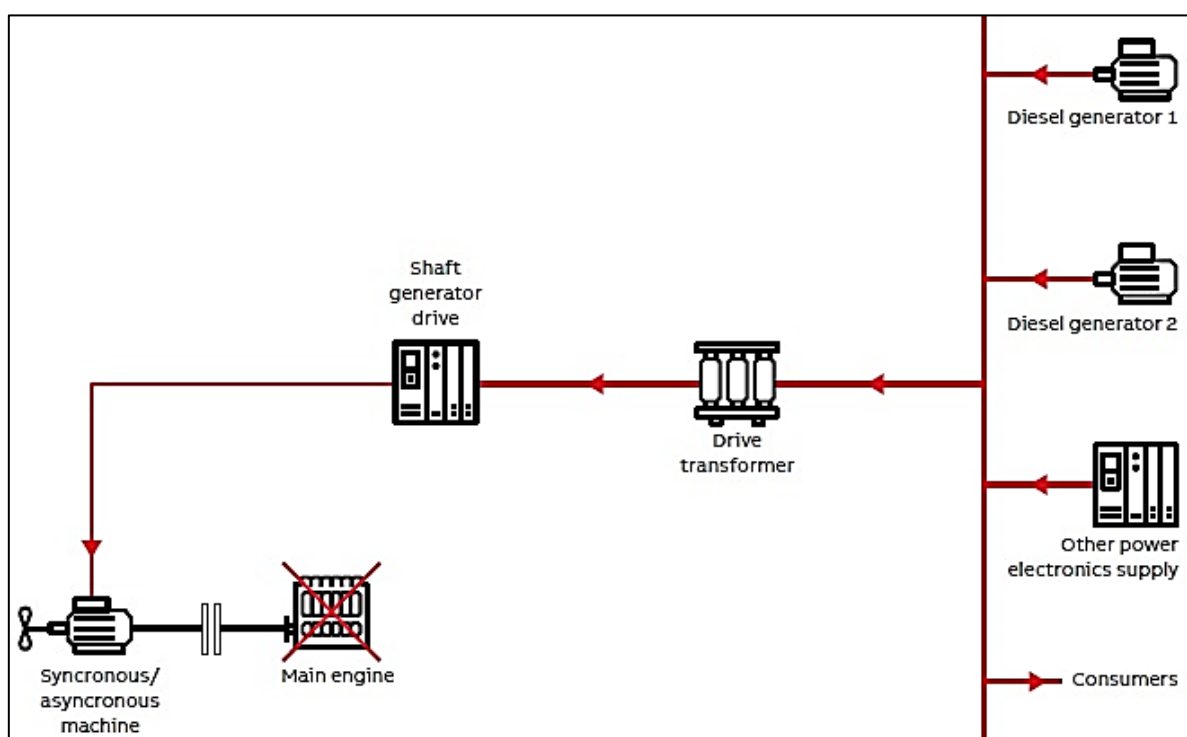


Рис. 6 - Режим повернення додому (PTH)

Зв'язок між берегом і судном

З екологічних міркувань важливо мати можливість відключати допоміжні генератори, залишаючись в порту. З'єднання берег-судно пропонує рішення для підключення суднової мережі до порту. Оскільки робоча частота на судні та березі може відрізнятися, може знадобитися перетворювач частоти. Для цієї функціональності можна використовувати привод від валогенератора в якості альтернативи спеціального перетворювача (який може бути як на березі, так і вбудованим). Це рішення підтримує частоти мережі 50 і 60 Гц і різні рівні напруги. Перемикання з допоміжного генератора на режим "берег-судно" відбувається плавно за рахунок передачі навантаження від суднової мережі до приводу

валогенератора, підключеного до джерела живлення портової мережі. Коли привод валогенератора автоматично отримує повне навантаження, допоміжні генератори можуть бути зупинені і відключені. Отже, судова мережа живиться від з'єднання берег-судно, як показано на рис. 7. У цьому режимі головний двигун судна і допоміжні генератори можуть бути відключені. Шум і вібрації знизяться, а викиди і витрати палива будуть скорочені, залишаючись в порту.

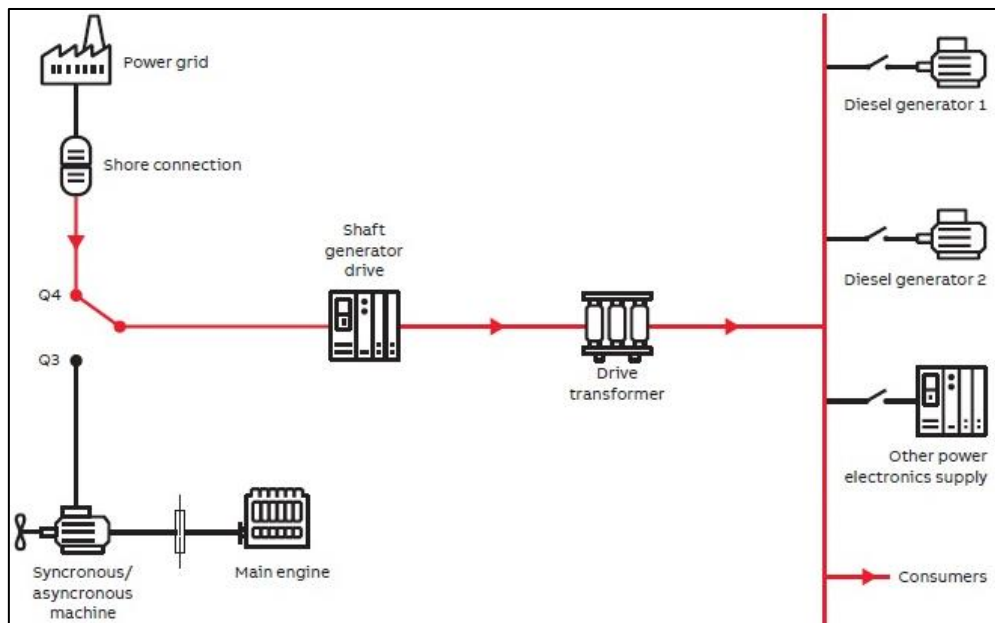


Рис. 7 - З'єднання берега з судном

2.3. Переваги системи і приводу валогенератора

Більш дешева енергія

Привод валогенератора - це джерело енергії, яке у більшості умов виробляє більш дешеву електроенергію, чим допоміжні генераторні установки. Генератор виробляє електричну енергію за рахунок потужності обертання, яку він отримує від валу, при цьому основний двигун споживає менше палива, ніж допоміжні генератори, на вироблений кіловат-годину. Це означає, що судно може обмежити використання допоміжних генераторів, скоротивши витрати палива, витрати, викиди і, за рахунок скорочення часу роботи, вимоги до технічного обслуговування генератора. Валогенератори можуть бути частиною рішення для забезпечення зниження пікових навантажень, забезпечуючи допоміжну

потужність для покриття піків і спадів та дозволяючи головним двигунам працювати в оптимально ефективних робочих зонах.

Зменшені втрати гвинта

Валогенератор, пов'язаний з гребним гвинтом регульованого кроку і частотно-регульованим приводом, дозволяє регулювати крок гребного гвинта для досягнення бажаної швидкості з максимальною ефективністю. При використанні гребного гвинта фіксованого кроку валогенератор може створювати навантаження для двигуна на низьких оборотах для досягнення максимальної ефективності.

Оперативна гнучкість

Завдяки частотно-регульованого приводу валогенератор може використовуватися у широкому діапазоні швидкостей обертання головного двигуна. Це забезпечує експлуатаційну гнучкість, наприклад, дозволяючи підтримувати номінальну вихідну напругу і частоту валогенератора. Ефективність може бути підвищена за рахунок того, що потужність на валу головного двигуна може використовуватися для вироблення електроенергії по всій робочій зоні.

Збільшений інтервал технічного обслуговування допоміжних генераторів, що виробляють електроенергію для суднової мережі з допомогою валогенератора, знижує необхідність використання допоміжних генераторів, а привод валогенератора підвищує гнучкість функцій РТІ/РТО. Можлива також паралельна робота з допоміжними генераторами. Скорочення часу роботи допоміжних генераторів знизить рівень шуму, а підвищена енергоефективність знизить викиди.

2.4. Проектування системи з використанням ACS880 MDLC

Базові рішення складаються з блоку живлення IGBT (ISU) з оптимальним управлінням мережею (OGC) на стороні суднової мережі і, залежно від необхідності, або інверторного блоку (INU), або блоку живлення IGBT (ISU), або блоку живлення діодів (DSU) на стороні генератора. Ці рішення і деякі спеціальні представлені нижче.

Режими роботи

Система відбору потужності (РТО)

В режимі відбору потужності приводи валових генераторів можуть працювати паралельно з іншими допоміжними генераторами, такими як допоміжні пристрої, як показано на рис. 8, або в автономному режимі, будучи єдиним джерелом живлення в мережі, як показано на рис. 9. RMC управляє напругою на лінії постійного струму, щоб підтримувати її в межах заданого діапазону. RMC може бути INU, діодним мостом або, в деяких випадках, ISU. За допомогою діодного випрямляча автоматичний регулятор напруги синхронної машини (AVR) забезпечує вхідний змінний струм і, таким чином, рівень випрямленої напруги ланцюга постійного струму. Особливості RMC пояснюються далі в розділі 3.3. SNC зазвичай працює як ISU, керований OGC, або самостійно, або паралельно з іншими джерелами живлення. ISU може одночасно керувати або лінією постійного струму, або напругою змінного струму. В режимі відбору потужності ISU, керований OGC, знаходиться у режимі керування змінною напругою, і ISU не може подбати про регулювання постійної напруги, яке має бути передане RMC. SNC більш детально пояснюється в розділі 3.2.

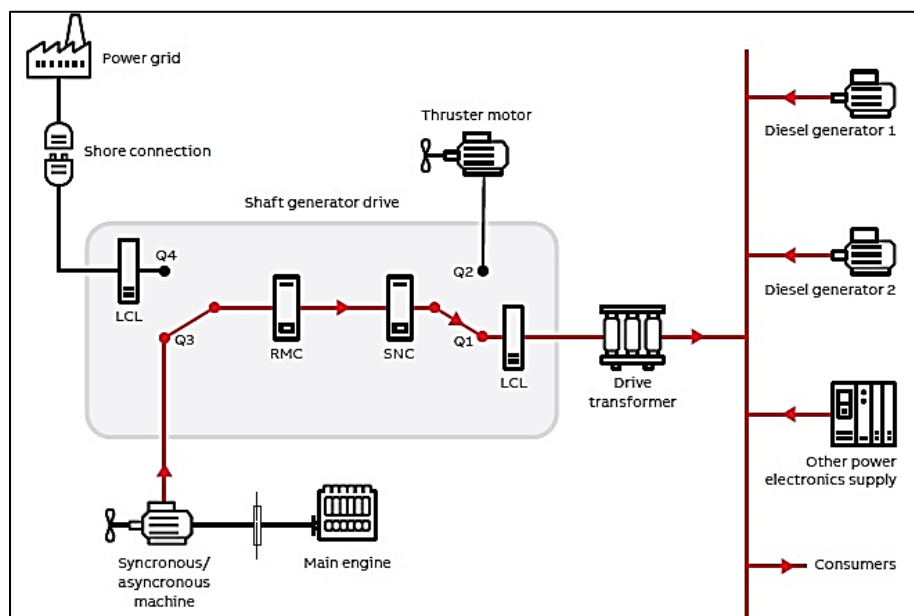


Рис. 8 – РТО, паралельний з іншими джерелами силової електроніки та допоміжних генераторів

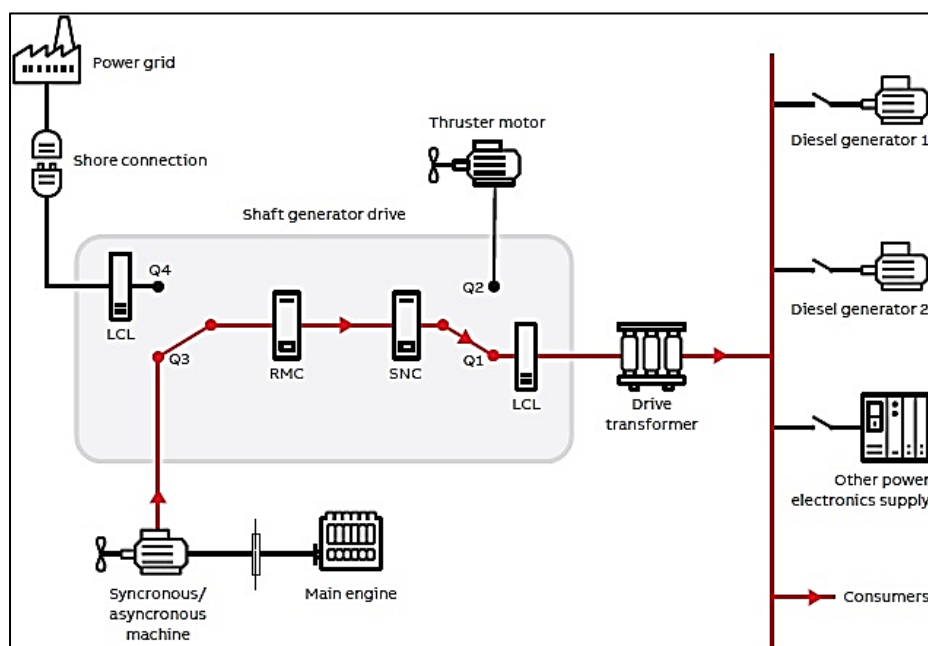


Рис. 9 – РТО, створює і підтримує автономний режим роботи мережі
Споживання потужності (РТІ)

В режимі РТІ валогенератор функціонує як двигун, як показано на рис. 10. Живлення береться від допоміжних пристроїв або іншої силової електроніки. Це забезпечує роботу головного двигуна за рахунок наявної електроенергії і збільшує швидкість судна. В режимі РТІ RMC працює як моторний привод (INU) або блок живлення (ISU) в режимі регулювання потужності. Блоком INU як RMC можна керувати за допомогою функції boost, або в режимі регулювання крутного моменту (див. Керівництво по програмному забезпеченню основного управління ACS880 3AUA0000085967). Функція boost - це функція зниження, яка може використовуватися в режимі регулювання швидкості. При зниженні зменшується вихідний сигнал регулятора швидкості (заданий крутний момент), пропорційний крутний момент двигуна і параметри понижувальної швидкості. Регулювання крутного моменту електричної машини - це найпростіший спосіб запустити головний двигун і електродвигун для обертання одного і того ж валу. Проте у цьому методі існує ризик розриву лінії валу в разі механічного пошкодження. Цей ризик необхідно усунути шляхом контролю частоти обертання двигуна і крутного моменту. Регулятор спаду - це регулятор частоти обертання з негативним зворотним зв'язком по навантаженню, і, таким чином, аналогічного ризику

розкручування валу при механічній поломки немає. В режимі PTI SNC працює як ISU, подаючи живлення на INU і контролюючи напругу постійного струму.

Режим маневрування

Режим маневрування - це опція в рамках SGD з наступними функціями. В режимі маневрування валогенераторний привод ACS880 може бути сконфігурований для живлення двигуна (двигунів) підрулюючого пристрою без додаткових перетворювальних пристроїв, як показано на малюнку 11. Функція підтримує декілька двигунів в залежності від кількості модулів силової частини. Щоб мати можливість подавати живлення на двигуни підрулюючих пристроїв, ISU необхідно сконфігурувати як INU. Це можна зробити з допомогою додаткового блоку управління і режими маршрутизатора. RMC працює як INU в режимі керування постійним струмом, керуючи крутним моментом електричної машини за допомогою вбудованого контролера постійної напруги.

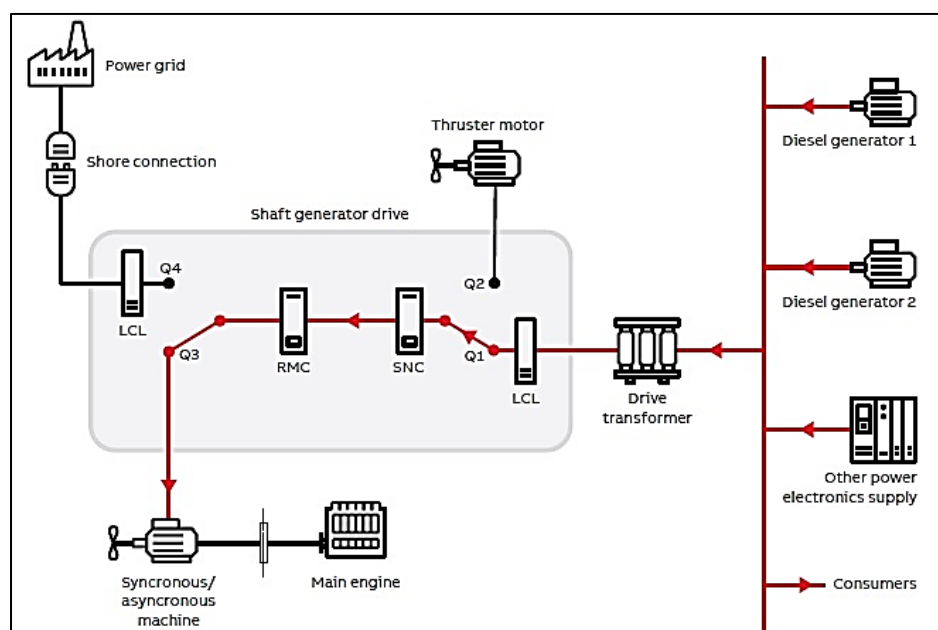


Рис. 10 – Допоміжний режим PTI

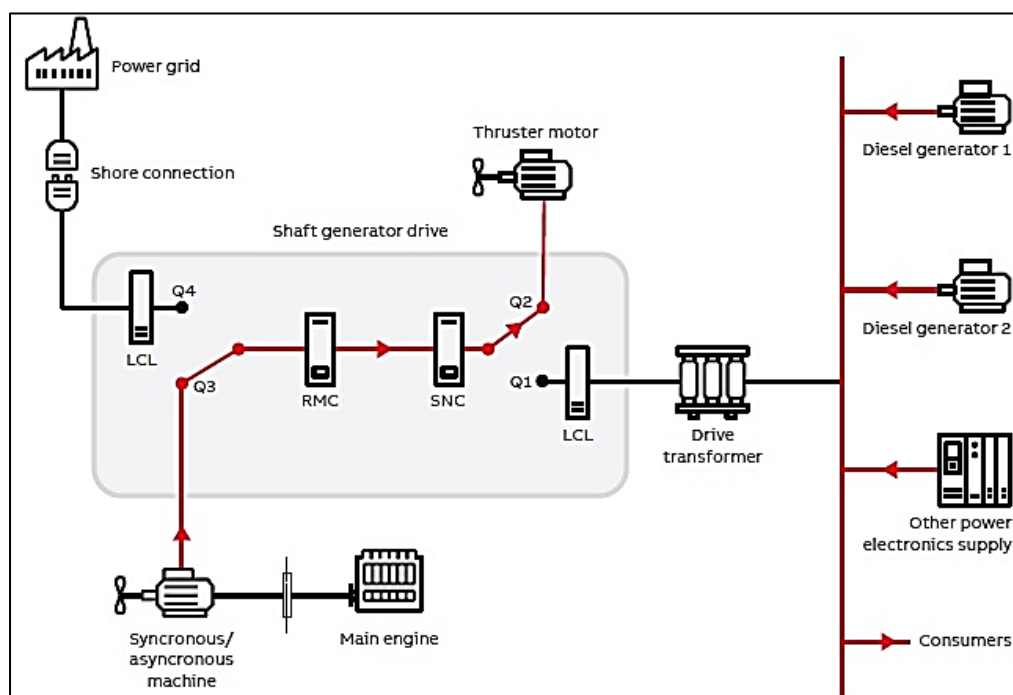


Рис. 11 - Режим маневрування

Режим повернення додому (РТН)

РТН - це опція в рамках SGD з наступними функціями. В режимі роботи РТН валогенератор функціонує як двигун. Валогенератор може використовуватися в якості альтернативи головному двигуну для приведення в рух, якщо муфта на лінії валу між головним двигуном і машиною може бути розімкнута (зчеплення). Це може статися в ситуаціях, коли основний двигун не може використовуватися при роботі з низьким навантаженням або при роботі з нульовим рівнем викидів в чутливих зонах (у поєднанні з акумуляторами). Потім живлення береться від допоміжних генераторів та іншої силової електроніки. Потужність, доступна для цього режиму, менше номінальної, тому потужність також буде обмежена порівняно зі звичайним режимом роботи. В режимі РТН RMC і SNC працюють аналогічно режиму РТІ. RMC працює як привід, а SNC - як ISU. SNC подає живлення на INU і контролює напругу постійного струму.

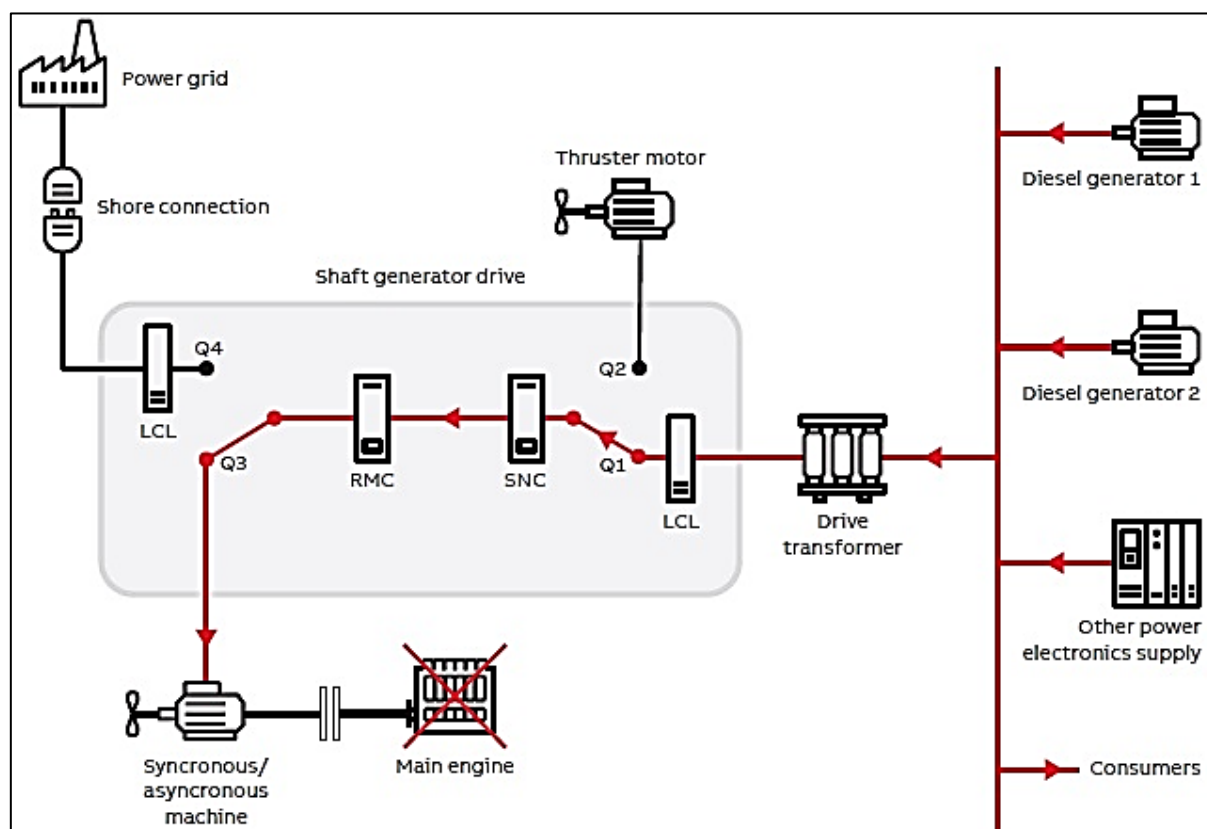


Рис. 12 - Режим повернення додому (PTH)

Зв'язок між берегом і судном

Підключення від берега до судна - це опція в рамках SGD з наступними функціями. З екологічних міркувань важливо мати можливість відключати допоміжні генератори, залишаючись в порту. З'єднання берег-судно пропонує рішення для підключення суднової мережі до порту, як показано на рисунку 13. Це рішення підтримує частоти мережі 50 Гц і 60 Гц і різні рівні напруги. Перемикання з допоміжного генератора на режим "берег-судно" відбувається плавно за рахунок передачі навантаження від суднової мережі до приводу валогенератора, підключеного до джерела живлення портової мережі. Коли привод валогенератора автоматично отримує повну навантаження, допоміжні генератори можуть бути зупинені і відключені. Отже, судова мережа живиться від з'єднання берег-судно. У цьому режимі головний двигун корабля і допоміжні генератори можуть бути вимкнені. Шум і вібрації знизяться, а викиди і витрати палива скоротяться під час перебування в порту. Необхідна допоміжна інфраструктура в порту.

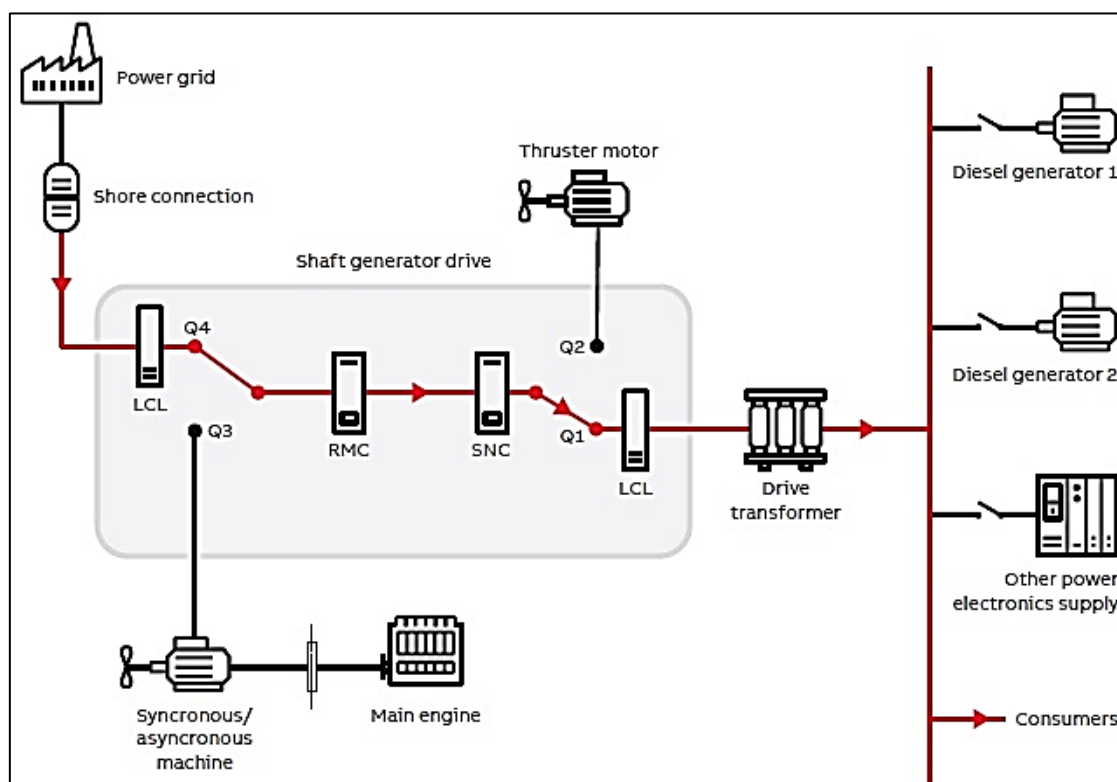


Рис. 13 - Режим "Берег-судно"

У режимі "берег-судно" SNC працює як ISU, керована OGC, аналогічно режиму відбору потужності. RMC працює як ISU для подачі енергії і забирає необхідну енергію з боку змінного струму і контролює напругу постійного струму в проміжних ланцюгах. Для підключення до мережі потрібно LCL-фільтр.

2.5. Типи SNC-перетворювачів

ISU, контрольована OGC

OGC є найбільш поширеним режимом управління ISU при використанні в роботі SNC-перетворювача. У цьому режимі реактивна і активна потужності регулюються з допомогою droop control, і ISU може як створювати мережу в ситуації "чорного запуску", так і подавати струм короткого замикання для забезпечення активації захисту від короткого замикання. Оптимальне керування мережею більш докладно описано в керівництві по застосуванню гібридного судна – оптимальне керування мережею (3AXD10001372553). Рекомендується вибирати напругу постійного струму рівною $U_{DC} = 1,45 \cdot U_N$, де U_N - номінальна напруга перетворювача. Вибір напруги приводного трансформатора залежить від необхідного реактивного струму. Необхідно передбачити резерв напруги для індуктивних втрат напруги, а також для компенсації несиметричного струму або

гармонік. Більш детальну інформацію можна знайти в керівництві по застосуванню Hybrid vessel – Optimal grid control (3AXD10001372553). Приводний трансформатор рекомендується використовувати з валогенератором для:

- Одержання резерву напруги
- Обрізання шлях струму для синфазних струмів
- Створення шлях нейтрального потенціалу струму

ISU в режимі керування постійним струмом і в режимі керування потужністю ISU може використовуватися в режимах керування постійним струмом або в режимах регулювання потужності, коли не потрібні функції підтримки мережі і паралельна робота з іншими джерелами живлення. Однак у режимі керування потужністю ISU потрібне зовнішнє джерело живлення. В обох режимах ISU потрібно існуюча мережева напруга. Як і у випадку ISU з управлінням OGC, для цих режимів роботи також потрібно резерв напруги для компенсації втрат напруги, викликаних реактивним струмом.

Інверторний блок INU

INU може використовуватися в режимі маневрування для подачі живлення на носові підрулюючі пристрої. В режимі маневрування в якості INU можна використовувати силові модулі, які використовуються в якості ISU в інших режимах роботи (PTO, PTI, PTH). Для цього потрібні окремі плати управління як для INU, так і для ISU, а також використання функції "режим маршрутизатора". Режим роботи маршрутизатора описано в керівництві по вбудованому програмному забезпеченню основної керуючої програми ACS880 (3AUA0000085967).

2.6. Типи перетворювачів обертових машин

INU

INU призначений для підтримки асинхронних машин (IM), машин з постійними магнітами (PM) і синхронних машин (SM). Перетворювач може керувати намагніченістю і обертовим моментом машини у широкому діапазоні частот. У цьому режимі управління перетворювач може працювати від нульової до

максимальної частоти обертання машини як в генераторному, так і в моторному режимах. Синусоїдальний фільтр може використовуватися з INU для фільтрації міжлінійної напруги у формі імпульсів, щоб зменшити втрати, викликані гармонійними напругами. Синусоїдальний фільтр може використовуватися як в режимі DTC-управління, так і в режимі скалярного управління. Основним обмеженням при використанні синусоїдального фільтра є те, що запуск перетворювача за допомогою обертового двигуна (плавний пуск) не підтримується. Напруга між лініями для великих електричних машин зі спеціальними приводними трансформаторами зазвичай відносно низька, оскільки вони зазвичай мають намотані на форму котушки статора. Цей метод намотування забезпечує більшу відстань між частинами обмотки при різних потенціалах, радикально знижуючи напругу, викликане вмістом гармонік в міжлінійній напрузі, в порівнянні з машинами з котушками з довільною намотуванням. З цих причин синусоїдальний фільтр не потрібно для застосування у валових генераторах, якщо тільки виробник машини спеціально не вимагає його включення.

Режими управління двигуном

Прошивка INU підтримує пряме регулювання крутного моменту (DTC) на основі моделей IM, PM і SM, а також скалярне управління по кривій U/f . Управління намагніченістю машини здійснюється за допомогою модельного регулятора потоку в режимі управління DTC чи управління на основі U/f кривої в скалярному режимі. Контрольний крутний момент зазвичай задається вбудованим контролером напруги постійного струму, але він також може бути взятий з зовнішньої системи в застосуваннях, де регулюванням напруги постійного струму займається інший пристрій. INU не має функції керування постійною напругою в режимі скалярного управління. Струм намагнічування подається від випрямляча постійного струму для машин зі щітками і ковзаючими кільцями або від AVR для синхронних машин з пристроєм, що намагнічує, постійного і змінного струму.

Підтримувані режими роботи валогенератора

РТО. При дуже низькій швидкості машини для намагнічування постійним і змінним струмом не можуть створювати струм намагнічування. Робота на низькій швидкості зазвичай обмежена виробником машини.

РТІ. Робота на низькій швидкості підтримується всіма типами машин, крім синхронних машин з намагнічуванням AVR. РТН.

РТН. Робота в якості двигуна підтримується всіма типами машин, крім синхронних машин з намагнічуванням AVR. Це пов'язано з тим, що запуск їх на нульовій швидкості або в якості двигуна може бути ускладнений або навіть неможливий.

Режим маневрування. З боку RMC управління INU в режимі маневрування не відрізняється від управління в режимі відбору потужності.

ISU

ISU в режимах керування постійним струмом і потужністю призначений для роботи в жорсткій промислової мережі. Він також може бути використаний в слабкій ізольованій мережі при виконанні наступних умов:

- Напруга живлення по всій робочій зоні перевищує 50% від номінальної напруги перетворювача.
- Частота перевищує 35 Гц.
- Швидкість зміни частоти становить менше 10 Гц / 0,2 с. Більш швидкі зміни інтерпретуються як колапс мережі, активувавши функцію "втрата мережі". Ця функція докладно описана в керівництві з експлуатації блоку живлення ACS880 IGBT FW (3AUA0000131562).

Необхідний допоміжний вимірювальний блок (BAMU) зі слабкими мережами (коефіцієнт короткого замикання менше 10).

При напругах нижче номінального ISU підтримує напругу шини постійного струму на заданому рівні за допомогою функції підвищення. Підвищення напруги викликає додаткову теплове навантаження на дроселі LCL, що призводить до зниження потужності. Інструкції щодо зниження потужності наведені в керівництві з обладнання блоку живлення ACS880 IGBT (3AUA0000130644).

ISU також може використовуватися в спеціальному сполученні з генератором, коли, на додаток до вищевказаних умов, виконуються наступні:

- При запуску ISU генератор вже виробляє напругу, значення якого знаходяться в межах наведених вище допусків.
- Збудження двигуна забезпечується і контролюється іншим джерелом, наприклад, АБР або постійними магнітами. Машини з намагніченим статором, такі як асинхронні машини або індуктивні синхронні машини, не працюють з ISU.
- Номінальна повна потужність генератора становить понад 30% від номінальної повної потужності ISU. Це запобігає неконтрольоване резонанс між LCL-фільтром і індуктивностями напруги генератора. Регулювання напруги генератора зазвичай виконується дуже повільно, щоб стабілізувати можливий резонанс, і управління ISU не може стабілізувати напругу до його модуляції.
- Відношення струму короткого замикання генератора I_{SC}'' і номінального струму ISU I_N (також відоме як коефіцієнт короткого замикання в перехідний період) повинно бути більше двох:

$$I_{SC}''/I_N > 2$$

Частотна область

Частотний діапазон ISU обмежений вбудованою функцією контролю "втрати мережі", яка контролює вхідну напруга перетворювача. Щоб уникнути непотрібного спрацьовування захисту від втрати мережі", допустима швидкість зміни частоти генератора з ISU повинна підтримуватися на рівні 50 Гц /с. В разі, якщо це неможливо, необхідно взяти до уваги обмеження функції "чисті втрати". Функція "втрати мережі" описана в керівництві по програмному забезпеченню програми керування живленням IGBT ACS880 (3AUA0000131562).

Підтримувані режими роботи валогенератора

РТО. В режимі відбору потужності генератор формує зовнішню мережу, від якої запускається ISU. Повинні бути виконані вимоги до коефіцієнта короткого замикання, напруги і частоти.

PTI. Режим PTI з RMC-ISU з точки зору управління аналогічний режиму відбору потужності. Контролер напруги постійного струму визначає напрямок подачі живлення. Коли потужність надходить з мережі в перетворювач, напруга постійного струму має тенденцію до збільшення, і RMC-ISU передає енергію з ланцюга постійного струму на вал. Перемикання з PTI на PTO і навпаки здійснюється шляхом зміни напрямку потоку потужності SNC. RMC з регульованою напругою постійного струму слідує за потоком енергії в шині постійного струму, підтримуючи бажаний рівень постійної напруги.

Режим маневрування. В режимі маневрування RMC-ISU веде себе так, як якщо б він знаходився в режимі відбору потужності.

PTH. Зверніть увагу, що цей режим, природно, не підтримується ISU. Щоб мати можливість запустити ISU, машина повинна обертатися і формувати напругу, відповідну вимогам ISU. Існує два способи запустити машину, що живиться від RMC-ISU, в режимі PTH:

- Запуск двигуна за допомогою іншого джерела живлення для збільшення його швидкості до робочої зони, а потім запуск ISU. Таким джерелом живлення може бути, наприклад, міні-мотор.

- Використання пристрою плавного пуску або INU (наприклад, в режимі скалярного управління) для збільшення частоти обертання двигуна, а потім запуск ISU при обертанні машини. Якщо для роботи в якості INU і ISU використовуються одні і ті ж силові модулі, то привід повинен бути оснащений двома окремими платами управління, однією для ISU і другий для INU. Підключення та вибір двох плат управління можна виконати в режимі маршрутизатора, який описаний в керівництві по вбудованому програмному забезпеченню основної керуючої програми ACS880 (3AUA0000085967). При проектуванні системи необхідно враховувати час перемикання між модулями. Використання RMC-ISU в режимі PTH ускладнено, і його налаштування може бути технічно складним. Коли потрібно PTH, INU володіє чудовими властивостями управління в порівнянні з ISU, і це технічно більш безпечний вибір.

Режими управління ISU

ISU може працювати в трьох режимах: режимі OGC, режимі керування постійним струмом і режимі керування потужністю. Найбільш поширеним режимом управління ISU при з'єднанні з генератором є режим керування постійним струмом. У режимі керування постійним струмом активна потужність і її напрямок адаптуються до значення, яке підтримує постійне значення напруги. Потужність генератора в цьому режимі визначається іншими блоками, які підключені до тієї ж шини постійного струму.

В режимі регулювання потужності потужність генератора визначається ISU, який відповідає зовнішнім еталонам потужності. До шини постійного струму необхідно підключити інший пристрій для регулювання напруги постійного і підтримки його рівня постійним. Існують окремі регулятори активної і реактивної потужності. Вони описані в керівництві по прошивці програми керування живленням ACS880 IGBT (3AUA0000131562).

Режим OGC радикально відрізняється від інших режимів ISU. В режимі OGC ISU може як створювати мережу, так і працювати в слабкій мережі. Іншими словами, він може працювати в мережах з дуже низьким коефіцієнтом короткого замикання. В режимі OGC перетворювач управляється контролерами droop, а регулювання напруги постійного струму повинно здійснюватися іншим пристроєм. Режим OGC докладно обговорюється в керівництві по застосуванню гібридного судна для оптимального керування мережею (3AXD10001372553)

ISU в двох словах

- Плюси:
 - Простота введення в експлуатацію, зазвичай, невелика потреба в налаштуванні, пов'язаної конкретним застосуванням.
 - Має вбудований регулятор постійної напруги.
- Мінуси:
 - Потреба в LCL фільтрах, які займають багато місця і є важким компонентом
 - Довгий список обмежень (вище)
 - Робота при напрузі чи частоті, що відхиляються від номінальних значень, вимагає зниження номінальної потужності.

- Якщо потрібна настройка, пов'язана із специфічним застосуванням, це не просто зробити.

- Складний в організації режим РТН

Діодний блок живлення DSU

DSU являє собою шести-імпульсний діодний випрямляч, який призначений для подачі енергії в ланцюг постійного струму з існуючої мережі. Діодний міст може пропускати струм і потужність тільки в одному напрямку, що обмежує підтримувані режими роботи. Коли він використовується з валогенератором, збудження машини повинно подаватися і регулюватися іншим джерелом. Це означає, що його не можна використовувати з індукційної машиною.

Підтримувані режими роботи валу відбору потужності генератора. В режимі відбору потужності генератор виробляє напругу, що випрямляється DSU. Напруга має бути достатньою для забезпечення необхідної напруги постійного струму.

РТІ. Не підтримується

РТН. Не підтримується

Режим маневрування. Підтримується.

Пульсація напруги

Для якісного перетворення змінної напруги від джерела постійного струму постійна напруга має бути вище амплітуди перетворюваної змінної напруги. Якщо напруга постійного струму занадто низька напруга змінного струму буде спотворено, викликаючи низькочастотні гармоніки та / або ємнісний потік реактивної потужності. Використовуючи позначення U_{grid} для потрібної середньоквадратичної напруги суднової мережі і U_{dc} для напруги в шині постійного струму перетворювача, мінімальний рівень постійної напруги для ISU, керованого OGC, становить

$$U_{DC} \geq 1.03 * \sqrt{2} * U_{grid}$$

Коефіцієнт 1.03 - це резерв втрат напруги в перетворювачі.

Напруга постійного струму шести-імпульсного діодного моста являє собою напругу у формі імпульсу, пікове значення якого $U_{DC peak}$ є амплітудою напруги генератора U_{gen}

$$U_{dc\ peak} = \sqrt{2} * U_{gen}$$

В ідеальному перетворювачі постійна напруга була б повністю фільтрована і її значення було б таким же, як амплітуда напруги генератора. Виходячи з цього припущення і використовуючи наведену вище інформацію, можна вивести рівняння для розрахунку залежності між напругою генератора і напругою мережі при повній фільтрації постійної напруги.

$$U_{gen} \geq 1,03 * U_{Grid}$$

Постійна напруга шести-імпульсного випрямляча, однак, фільтрується не повністю, а має форму імпульсу. Через невелику ємність шини постійного струму форма постійної напруги при повному навантаженні являє собою майже чисту шести-імпульсну напругу. Форму напруги між двома піками можна побачити на малюнку 14. Пульсація визначає мінімально допустима напруга змінного струму генератора і, отже, також найменшу робочу частоту.

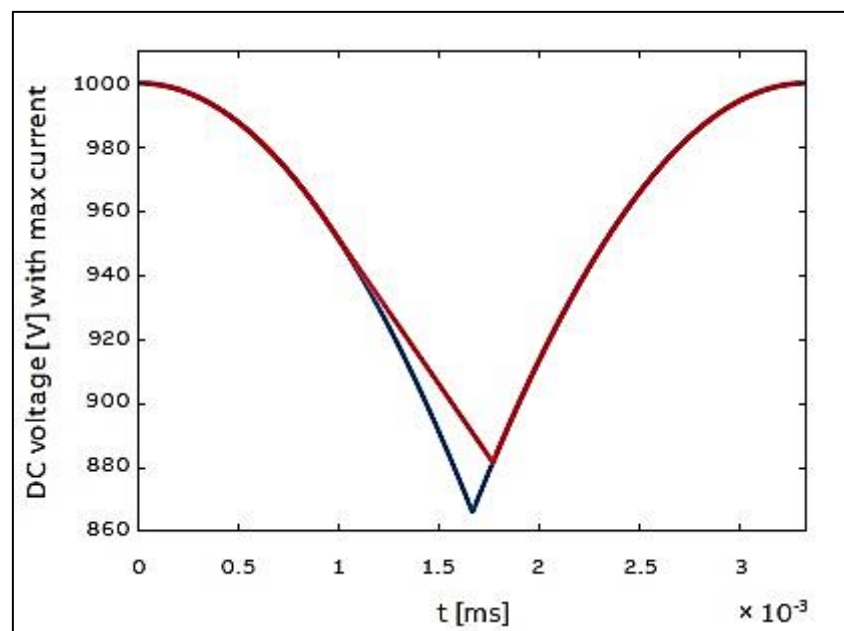


Рис. 14 – Постійна напруга шести-імпульсного перетворювача з максимальним струмом. Червона крива відображає фільтруючий ефект конденсаторів постійного струму

Червона крива являє фільтруючий ефект конденсаторів постійного струму. Якщо напруга постійного струму нижче амплітуда генеруючої напруги змінного струму, наприклад, через періодичних перепадів напруги, це викликає спотворення в напрузі змінного струму. У цій ситуації гарантовані показники

продуктивності не досягаються. Як видно на рис.14, ємність постійного струму надає явну фільтруюче вплив на пульсації постійної напруги. Вплив фільтрації залежить від струму навантаження і величини ємності.

На рис. 15 представлена величина падіння напруги, викликаного струмом навантаження. Крива розрахована на стороні змінного струму при частоті 50 Гц. Падіння напруги на частоті 50 Гц будь-якої комбінації приводів можна оцінити за допомогою цієї кривої, використовуючи значення струму навантаження / кількість модулів в якості вхідного струму.

Вимоги до напруги генератора з урахуванням пульсацій напруги постійного показано на рисунку 15. Використовуючи позначення $U_{\text{падіння}}$ для падіння напруги змінного струму по вертикальній осі на малюнку 15, записується вимогу:

$$U_{gen} \geq 1.03(U_{grid} + U_{drop})$$

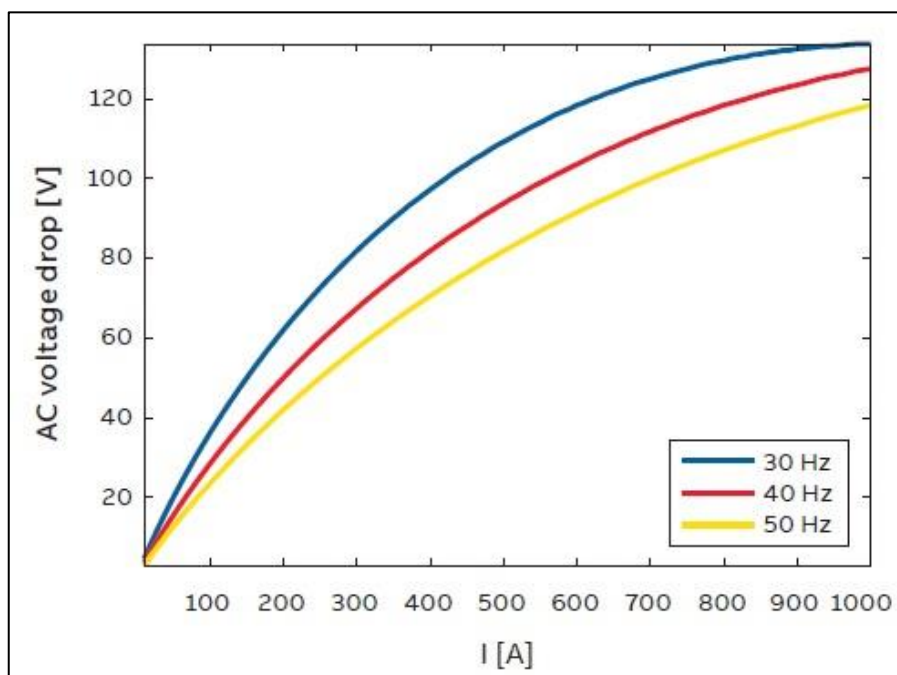


Рис. 15 - Падіння змінного напруги шести-імпульсного діодного моста в залежності від струму навантаження в системі привода, що складається з одного модуля R8i, при частотах генератора 30 Гц, 40 Гц 50 Гц

Коефіцієнт 1.03 у наведеному вище рівнянні призначений для компенсації втрат напруги в системі при активному навантаженні. Крім того, на стороні SNC може знадобитися резерв напруги (див. Керівництво по застосуванню гібридного судна для оптимального керування мережею 3AXD10001372553), який необхідно

додати до члена падіння напруги в наведеному вище рівнянні. Коли потрібно реактивна потужність джерела живлення, в індуктивностях LCL SNC-перетворювача будуть відбуватися помітні додаткові втрати напруги. Це повинно бути компенсовано використанням більш високої напруги постійного струму або приводного трансформатора.

Вимоги до напруги постійного струму на практиці обмежують частотну область зони ослаблення поля машини. Наслідки цього обговорюються пізніше, окремо для різних типів машин.

Більш низька ефективна постійна напруга діодного моста призводить до більш низької змінної напруги на стороні SNC. Для досягнення тієї ж вихідної потужності при більш низькій напрузі потрібен більший струм. Це може призвести до необхідності в більшій ISU і LCL. Слід перевірити вплив падіння напруги на всю систему.

Перетворювач, фільтри і напруга для ізоляції машини

Напруга, що діє на ізоляцією машини, зазвичай найвища між фазою і корпусом. Ця напруга не пом'якшується міжфазними фільтрами, такими як LCL-фільтр або синусоїдальний фільтр. Висока напруга викликається відображеннями і резонансами. Жодне з цих явищ не може викликати небезпечної напруги в коротких кабелях, і, таким чином, напруга на обмотці генератора в системах з валовими генераторами зазвичай є допустимою.

Проте деякі виробники обладнання вимагають використання синусоїдального фільтра з перетворювачем частоти. Синусоїдальні фільтри зменшують гармонійні складові напруги, надаючи формі напруги більш синусоїдальний вигляд. Щоб уникнути непотрібних витрат, вимоги до продуктивності фільтра повинні бути вказані в тих випадках, коли вони необхідні.

2.7. Комутаційні шафи

ACS880 multidrive - це гнучкий продукт, який може бути оснащений відповідними проекту вимикачами або автоматичними вимикачами. Пов'язаний з проектом дизайн розподільних осередків необхідний для:

- Байпасу

- Режим "З берега на судно"
- Режим маневрування

2.8. Байпас

Існує три різних способи запуску електричної машини з перетворювачем частоти, підключеної до мережі:

- Запуск машини може бути синхронізований.
- Машина може розганятися за допомогою перетворювача частоти до повної швидкості з подальшим підключенням до мережі після затримки розмагнічування.
- Машина може почати підключення до мережі без намагнічування на нульовій швидкості (зазвичай за допомогою плавного пуску).

Всі ці методи мають різний вплив, який докладно обговорюється в наступних підрозділах. Перетворювач частоти не має вбудованих функцій для підтримки управління машинами, підключеними до DOL. Це означає, що управління швидкістю обертання, потужністю, частотою і т. д. Має здійснюватися через зовнішню систему управління.

Прямий запуск валогенератора в режимі РТН простий, коли валопровід оснащений гребним гвинтом із змінним кроком, однак в режимі відбору потужності потрібно а засіб для регулювання як активної, так і реактивної потужності шляхом регулювання напруги і частоти.

Найбільш складним режимом роботи DOL є режим РТІ. Він вимагає розподілу потужності між електричною машиною, підключеної до DOL, і основним двигуном. Стабільність регулювання потужності вкрай важлива, але може виявитися вирішення.

Синхронізація напруг

Підключення великих машин до слабкої мережі викликає провали напруги, які можуть призвести до серйозних порушень в мережі, а в гіршому випадку - до відключення електроенергії. Найбільш ефективним способом пом'якшення перехідних процесів перемикання є синхронізація електричної машини з мережею.

Для синхронізації потрібне, щоб напруга на клеммах машини мала б ту ж частоту, фазу та величину, що і напруга мережі. Блок синхронізації необхідний для вимірювання напруги і відключення автоматичного вимикача при виконанні заздалегідь встановлених умов синхронізації.

Синхронізація машин, механічно пов'язаних з основним двигуном

Синхронізація синхронних машин з зовнішнім збудженням і синхронних машин з постійними магнітами може бути виконана, коли вони підключені до основного двигуна і електрично відключені від приводу. Для цього методу синхронізації потрібен зовнішній пристрій синхронізації. Швидкість обертання і збудження повинні регулюватися вручну або за допомогою зовнішньої системи автоматизації. Для синхронізації генератора РМ напруга мережі повинна бути налаштована у відповідності з напругою генератора, оскільки напругою генератора не можна вільно керувати через фіксоване збудження машини РМ. Якщо напруга мережі не може бути налаштована, виникне різниця напруг, яка викличе перехідний струм при підключенні і реактивний струм у сталому режимі.

У машинах SM збудження контролюється, і можна компенсувати як перехідний, так і сталий реактивний струм.

Синхронізація машин, механічно від'єднаних від основного двигуна

Асинхронна машина намагнічується через обмотку статора, і тому вона не може створювати напругу після відключення від джерела живлення.

Щоб мати можливість синхронізувати асинхронну машину з електромережею, вона повинна управлятися і живитися частотним перетворювачем для намагнічування її, і зазвичай вона повинна бути від'єднана від двигуна. Процедура починається з розгону машини до синхронної швидкості за допомогою перетворювача частоти. Перетворювач створює в машині зустрічну напруга (електричну рушійну силу), яка потім синхронізується з мережею. Процедура синхронізації механічно розв'язаних РМ-пристроїв і SM-пристроїв аналогічна процедурі синхронізації для ІМ-пристроїв.

Включення автоматичного вимикача до або після відключення приводу

Перемикання з джерела живлення перетворювача частоти на підключення до мережі може бути виконано двома різними способами (за умови дотримання умов синхронізації):

- Автоматичний вимикач замикається перед зупинкою перетворювача.
- Автоматичний вимикач замикається після зупинки перетворювача.

Коли автоматичний вимикач замикається перед зупинкою INU, необхідний зовнішній дросель для обмеження піків струму, які викликані формою імпульсу напруги. Індуктивність дроселя буде складати не менше десяти відсотків або більше від базового імпедансу INU. Базове опір x_b можна розрахувати за номінальним значенням INU:

$$x_b = \frac{U_N^2}{S_N}$$

Автоматичний вимикач замикається після зупинки перетворювача, щоб уникнути необхідності в зовнішньому дроселі. Недоліком цього методу є те, що під час спрацьовування автоматичного вимикача (50...100 мс) машина буде сповільнюватися, а у випадку з асинхронним двигуном потік буде затухати. Це призводить до помилки напруги, що приводить до перехідного струму при перемиканні. Цей метод практично завжди призводить до перехідного струму, який, однак, набагато менше, ніж був би без синхронізації. Цей метод використовується з блоком синхронізації RSYC-01 і ACS880.

Пристрій та його підключення докладно описані в керівництві користувача блоку синхронізації RSYC-01 (3AFE68827370) і керівництві по обладнанню інверторних блоків ACS880-107 (3AUA0000102519).

Запуск ненамагнічину машину на синхронної швидкості

Цей метод застосуємо тільки для асинхронних машин в режимі РТН. Пусковий струм (RMS) високий при звичайному безпосередньому запуску асинхронної машини в режимі онлайн. Зазвичай він у п'ять-сім разів перевищує номінальний струм. Під час запуску струм залишається високим до тих пір, поки частота (ковзання) ротора не досягне розрахункової робочої зони. Надмірних пускових струмів можна уникнути, збільшивши частоту обертання за допомогою

частотного перетворювача, який підтримує частоту обертання ротора в заданій робочій зоні протягом усього запуску асинхронної машини.

Однак, у разі якщо асинхронний двигун обертається та не намагнічений підключається до мережі, виникає дуже швидко спадаючий піку постійного струму, який приблизно такий же, як перехідний процес при звичайному прямому запуску в режимі онлайн. Постійна часу загасання перехідного піку становить всього кілька Мілі секунд.

Попередження

Намагнічена машина виробляє напругу, яка може мати різницю фаз з напругою мережі. Якщо ці напруги знаходяться на протилежних фазах під час підключення до мережі, піковий струм може перевищувати номінальний струм в 15 разів. Незважаючи на те, що піки струму швидко спадають, вони можуть привести до механічного пошкодження машини або коробки передач.

Важливо переконатися, що пристрій не намагнічен в момент підключення. З цієї причини між відключенням перетворювача і замиканням автоматичного вимикача повинна бути затримка в декілька секунд. Точний час залежить від параметрів машини. Замість використання затримки часу також можна забезпечити підключення без напруги, контролюючи напругу на клеммах пристрою і дозволяючи підключення автоматичного вимикача при падінні напруги на клеммах.

Якщо вихід перетворювача гальванічно не відділений від пристрою при замиканні автоматичного вимикача, рівень постійної напруги в перетворювачі повинен бути достатньо високим, щоб запобігти зворотній зарядку через діоди INU.

Запуск DOL (прямий онлайн)

DOL старт рідко використовується для великих машин в суднових мережах через шкідливий вплив на мережу. Він застосовний тільки в режимі РТН для асинхронних і синхронних машин, спеціально розроблених для прямого онлайн запуску.

Запуск DOL виконується зі стану покою. При запуску DOL перехідний струм аналогічний запуску обертальної машини (попередній розділ), але на додаток до перехідного процесу перемикання машина споживає високий пусковий струм. Стале середньоквадратичне значення пускового струму може легко перевищувати номінальний струм асинхронної машини в шість разів і навіть вище для синхронної машини. Зверніть увагу, що пусковий струм в каталогах виробників відповідає усталеному середньоквадратичне значення. Перехідний процес перемикання не згадується в каталогах. Перехідний процес загасає дуже швидко, але він може на мить подвоїти значення пускового струму. Запуск DOL синхронної машини викликає високу напругу в розімкнутій полюсній обмотці. У синхронних машинах це усувається шляхом замикання обмотки при запуску за допомогою вбудованого блоку захисту або, в деяких випадках, за рахунок конструкції ізоляції, яка витримує цю напругу. Обидва методи вимагають дій при проектуванні машини, і придатність машини для запуску DOL повинна бути підтверджена виробником.

2.9. Типи машин

Асинхронна машина (ІМ)

Асинхронна машина має широке використання. Максимальний крутний момент може бути отриманий від нульової швидкості до точки ослаблення поля, а номінальна потужність може бути отримана в зоні ослаблення поля.

Як описано в підрозділі 4.3.2., обмеження, встановлені охолодженням машини, можуть вплинути на цю продуктивність. Асинхронна машина намагнічується через обмотки статора і повинна управлятися за допомогою INU. Оскільки INU повинен подавати струм намагнічування, потрібно перетворювач більшої потужності, ніж у синхронних машинах.

Асинхронні машини зазвичай доступні тільки для рішень з відносно високою номінальною частотою обертання (зазвичай 1000 або 1500 об / хв) і використовуються з редуктором для використання частоти обертання приводного валу. Максимальна висота валу ІМ, доступна на ринку, обмежена виробничими труднощами, викликаними вимогою до невеликого повітряного зазору.

Обхід асинхронної машини можливий, але складний. Асинхронні машини, підключені до мережі безпосередньо, вимагають, щоб індуктивний струм відбирався з мережі, а не подавався на неї.

Другим обмежуючим фактором є те, що якщо асинхронна машина підключена до мережі без намагнічування, їй потрібно дуже високий пусковий струм. З цих причин великі асинхронні генератори зустрічаються дуже рідко.

Синхронна машина з зовнішнім збудженням (SM) з направляючими кільцями і щітками

Подібно асинхронним машин, синхронні машини з зовнішнім збудженням мають широку область застосування. Фактично, зовнішнє збудження забезпечує кращий момент спрацьовування і велику зону ослаблення поля, ніж це можливо з ІМ.

Синхронним машин із зовнішнім збудженням, оснащеним ковзаючими кільцями і щітками, потрібні два джерела живлення. Блок ІNU використовується для подачі активного живлення обмотки статора з хорошим коефіцієнтом потужності, а блок збудження (EXU) використовується для подачі струму намагнічування. ІNU управляє потоком машини і струмом збудження, керуючи EXU.

Управління синхронною машиною більш докладно описано в керівництві по застосуванню ACS880 для управління синхронною машиною (3AXD50000373581).

Синхронні машини можуть бути сконструйовані з гранично низькою частотою обертання і, отже, є рішенням для низькошвидкісних застосувань. Синхронні машини з направляючими кільцями можуть мати велику кількість полюсів, а максимальний розмір валового генератора визначається потужністю перетворювача, а не розмірами машини. Байпас не підтримується, оскільки управління збудженням здійснюється ІNU.

Синхронна машина зовнішнього збудження (SM) з автоматичним регулятором напруги (AVR)

Синхронна машина з AVR намагнічується за допомогою намагнічуючого пристрою постійного / змінного струму. Виходом AVR є постійний струм, який подається на статор машини, що намагнічується. Наведення струму намагнічування вимагає обертання ротора з деякою мінімальною швидкістю, що залежить від конструкції. Це обмежує мінімальну робочу швидкість машини. В іншому робоча зона аналогічна зоні IM і SM зі щітками і ковзаючими кільцями, які мають аналогічну організацію охолодження.

SM з AVR може використовуватися з ISU і DSU, якщо враховувати обмеження, пов'язані з перетворювачем. SM з AVR зазвичай випускається з відносно високою частотою обертання і потребує редуктора.

SM з AVR можна синхронізувати з мережею, пропустивши перетворювач. У цьому режимі роботи режим управління AVR повинен бути змінений на керування напругою.

Незважаючи на те, що струм намагнічування не може бути наведений в обмотках ротора при нульовій частоті обертання, деякі машини AVR можна запускати з повної зупинки. Машина працює як асинхронний двигун і управляється за допомогою INU в режимі скалярного управління. При проектуванні машини для такого використання зазвичай використовується один з наступних методів:

- Полюсну обмотку замикає вбудований комутаційний пристрій для запобігання наведення високої напруги в полюсну обмотку з боку статора.
- Допоміжний двигун використовується для запуску і досягнення мінімальної швидкості.
- Схема ротора посилена, щоб витримувати наведене напруга протягом обмеженої або необмеженої кількості пусків.

Проте жоден з цих методів не може забезпечити повний крутний момент при запуску з місця. В режимі РТН відсутність індукції при зупинці вимагає запуску в режимі скалярного управління. Придатність пристрою AVR для роботи в режимі РТН необхідно уточнити у виробника пристрою.

Синхронна машина з постійними магнітами (PM)

Машини РМ - це синхронні машини, в яких намагнічування створюється потужними магнітами. Їм не потрібні зовнішні блоки живлення збудження і регулятори потоку / напруги, на відміну від синхронних машин з зовнішнім збудженням.

Робота в зоні постійного поля подібна роботі синхронної машини з зовнішнім збудженням.

Ослаблення поля в машинах РМ може відбутися тільки за рахунок зниження рівня намагніченості машини, подаючи індуктивний струм через обмотку статора.

РМ може бути синхронізований з мережею минаючи перетворювач. Збудження постійним магнітом робить неможливою точне налаштування амплітуди напруги, але рівень напруги зазвичай досить близький до рівня мережевої напруги для автоматичного замикання вимикача. Висока індуктивність машин РМ ефективно обмежує пік струму перемикавання.

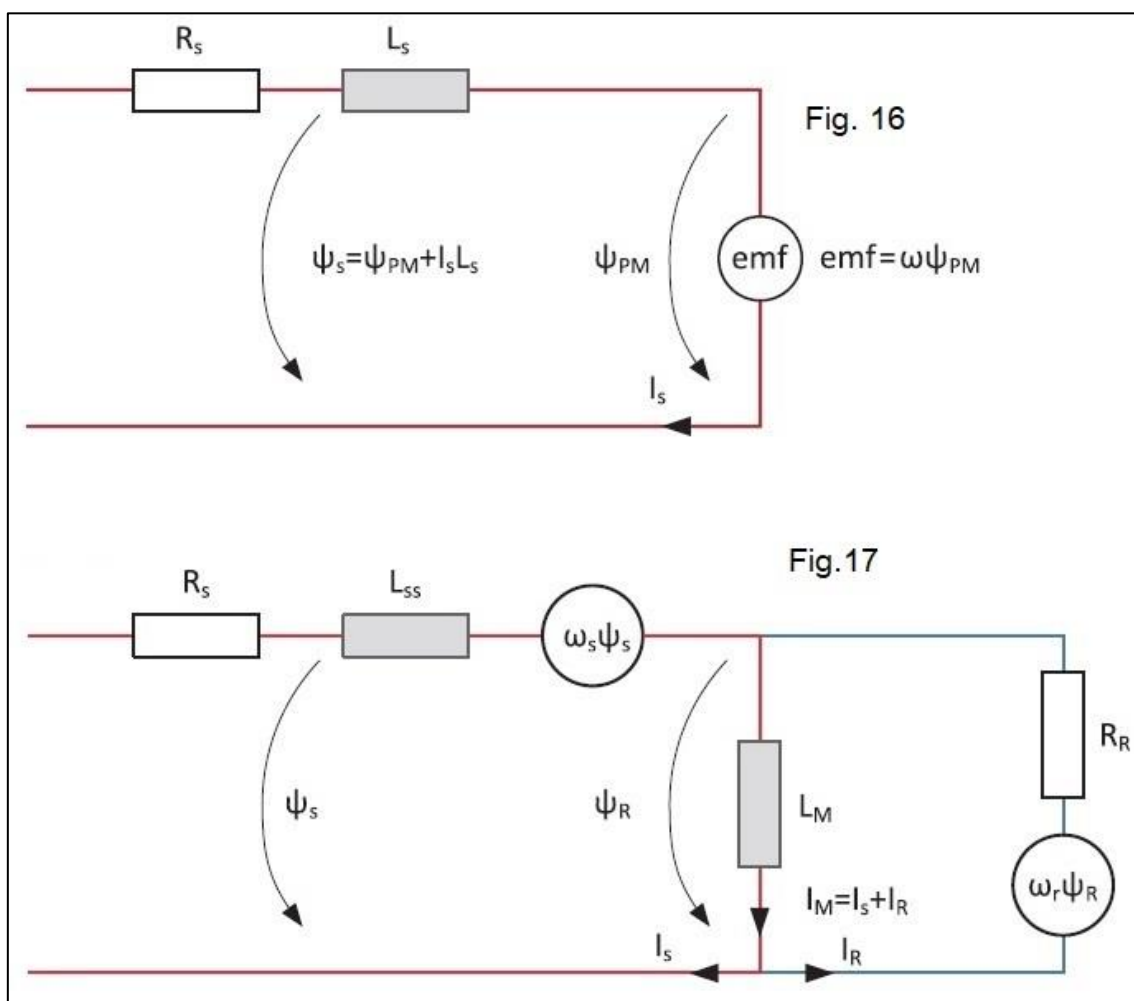


Рис. 16 - Схема заміщення машини з постійними магнітами; Рис. 17 – Схема заміщення асинхронної машини

Перенапруга, викликана індуктивністю статора

У машинах РМ струмове навантаження протікає через основну індуктивність, накопичуючи в ній багато енергії. Крім того, машини з низькою номінальною частотою обертання мають високий потік, що вимагає високої індуктивності. Це впливає з того факту, що потік електричної машини пропорційний електромагнітної сили ЕРС і обернено пропорційний кутовій частоті:

$$\psi = \frac{emf}{\omega}$$

Таким чином, машини з низькою номінальною частотою обертання мають високий потік, що вимагає високої індуктивності. При припиненні подачі ІНУ струм продовжує текти до тих пір, поки енергія індуктивності не розрядиться. Машини РМ зазвичай не оснащені демпфуючою обмоткою, тому енергія як взаємної індуктивності, так і індуктивності витoku статора може відводитися тільки через обмотку статора, силові кабелі і через діоди вільного ходу до шини постійного струму. Для довідки, для машин, оснащених короткозамкненою обмоткою в роторі (ІМ і SM), на перетворювач буде подаватися тільки індуктивність розсіювання статора, а енергія взаємної обмотки викликає струм в короткозамкненій обмотці. Після цього енергія розпадається, перетворюючись в тепло в опорах. Таким чином, енергія, відведена в перетворювач, становить всього близько 10-30 % від відповідного значення в РМ.

На рис. 16 представлена еквівалентна схема машини РМ. Струм статора відзначений червоним. Енергія індуктивностей розряджається у конденсатори постійного струму.

На рис. 17 представлена еквівалентна схема асинхронної машини (коли ω_r має значення 0, та ж еквівалентна схема може бути використана для опису обмоток статора і сепаратора машини SM). Струм статора показано червоним кольором, а струм ротора - синім. Енергія взаємної індуктивності LM може розряджатися в ланцюзі ротора, коли напруга статора перевищує ЕРС. Якщо енергія

індуктивностей не може бути подана в мережу, це призведе до зарядки конденсаторів постійного струму. Щоб уникнути пошкодження рівень напруги постійного струму не повинен перевищувати межі відключення, зазначеного в керівництві по вбудованому програмному забезпеченню програми основного управління ACS880 (3AUA0000085967). Рівень напруги постійного струму після розряду індуктивностей можна обчислити по наступному рівнянню:

$$U_{DC1} = \sqrt{\frac{3L_S \cdot I_S^2}{C} + U_{DC0}^2}$$

Де:

U_{DC1} — напруга постійного струму після подачі енергії індуктивності на конденсатори.

U_{DC0} — постійну напругу перед подачею енергії індуктивності на конденсатори.

I_S — Струм статора в момент зупинки перетворювача.

L_S — Індуктивність статора машини. Це сума індуктивності розсіювання статора L_{SS} і взаємної індуктивності L_M . У технічних паспортах машин РМ індуктивності зазвичай не відокремлені від компонентів, але там вказано тільки сума $L_S = L_{SS} + L_M$. Для явнополюсних машин можна використовувати середнє значення індуктивностей у напрямку d та напрямку q.

C — Загальна ємність шини постійного струму. Для системи з декількома приводами з рідинним охолодженням це зазвичай можна розрахувати як кількість модулів R8i, помножене на значення $9mF$ / модуль.

Можлива перенапруга на стороні мережі при початковому значенні напруги постійного струму при зупинці може вплинути на визначення значення U_{DC0} у наведеному вище рівнянні.

Небезпечного перенапруги можна уникнути, оснастивши ланцюг постійного струму перетворювача гальмівним резистором або іншим силовим електронним обмежувачем. Перенапруження, викликане зарядкою конденсаторів постійного струму енергією від індуктивності машини РМ, є швидким явищем, що має місце протягом однієї четвертої періоду резонансу між конденсатором постійного

струму і індуктивністю машини, зазвичай від 10 мс до 20 мс для великих машин (> 1 МВт). Це явище неможливо запобігти за допомогою автоматичного вимикача через їх відносно довгий час відключення, який зазвичай становить 60 мс або більше.

Ослаблення поля

Використовуючи позначення ψ_{PM} для потоку, що створюється постійними магнітами, та ω для кутової частоти, ЕРС машини РМ можна описати рівнянням:

$$emf = \omega \cdot \psi_{PM}$$

При ослабленні поля ЕРС перевищує значення напруги статора, проштовхуючи через індуктивність статора реактивну складову струму. Коли обертова машина знаходиться в стані зупинки, ЕРС змушує протікати струм через діоди вільного ходу до перетворювача до тих пір, поки рівень постійної напруги в перетворювачі не перевищить амплітуду ЕРС. Небезпечного перенапруження можна уникнути, оснастивши привід гальмівним резистором і / або двигун механічним гальмом.

ЕРС подає струм на привід тоді і тільки тоді, коли рівень постійної напруги приводу нижче амплітуди ЕРС. Якщо енергетична індуктивність збільшила рівень напруги постійного струму вище, ніж амплітуда ЕРС, то вона не може додатково заряджати ланцюг постійного струму до тих пір, поки напруга не зменшиться. З цієї причини більш високе значення цих двох явищ визначає найбільше значення напруги постійного струму і напруги, прикладеної до конденсаторів постійного струму.

Запуск в експлуатацію

Після відключення електроенергії системі валогенератора потрібна енергія для запуску. Ланцюг постійного струму перетворювача повинен бути заряджений перед запуском перетворювача і повинен бути забезпечений достатній запас енергії для намагнічування електричної машини. Основними проблемами, які необхідно вирішити, є:

- Де взяти заряд енергії?

- Де брати енергію збудження (у разі синхронних машин з зовнішнім збудженням)?
- Звідки брати енергію для блоку рідинного охолодження (LCU) (у разі перетворювача з рідинним охолодженням)?

У приводах валогенераторів з рідинним охолодженням насоси LCU можуть бути без зовнішнього джерела живлення під час «темного» запуску. Привід все ще можна запустити до подачі живлення на насоси. Однак насоси повинні бути запуснені протягом 15с після запуску SNC (або підключення будь-якого іншого навантаження до шини постійного струму), щоб запобігти перегріву компонентів.

Запуск в режимі РТН синхронної машини з AVR є складним завданням через методу намагнічування. При зупинці індукція в машині, що намагнічує машині відсутня, і струм намагнічування для основної машини не може бути вироблений.

Однак, якщо пристрої AVR використовуються в режимі РТН, перетворювач повинен працювати в режимі скалярного управління, а AVR повинен бути встановлений у режим U/f - control. Якщо AVR знаходиться в режимі регулювання напруги, то машина збудження може бути насичена на низькій швидкості, що послабить управління і викличе нестабільну роботу.

Скалярне управління ACS880 призначене для асинхронних машин. В принципі, він буде працювати і з іншими типами машин, але він не був протестований досить всебічно, щоб гарантувати стабільність у всіх конфігураціях.

Коли машина з намагнічуванням AVR запускається як індукційна машина, то крутний момент, який може бути створений, невеликий, і, отже, крок гвинта повинен регулюватися. Пусковий момент і придатність машини для використання в якості перетворювача частоти повинні бути уточнені у виробника машини.

Принципи регулювання потужності і напруги

Ланцюг управління повинен бути безперервним від машини до мережі. В режимі відбору потужності запускається ланцюг від мережі. Баланс потужності в мережі забезпечується мережевим перетворювачем, який забирає необхідну енергію з ланцюга постійного струму. Щоб підтримувати напругу постійного

струму на потрібному рівні, ланцюг постійного струму повинен бути оснащений окремим блоком для його управління. У валогенераторах перетворювач RMC управляє постійним струмом і забирає необхідну енергію від валу. Для підтримки обертання валу регулятор частоти обертання головного двигуна управляє уприскуванням палива, створюючи обертовий момент, необхідний у відповідності з навантаженням.

В режимі РТІ ланцюг управління змінюється на зворотну, починаючи з перетворювача RMC з регульованою частотою обертання валу і закінчуючи SNC з регульованою напругою постійного струму.

У більш великих гібридних системах цей ланцюг може бути більш складним, але основні принципи ті самі.

У ACS880 multidrive управління напругою постійного струму може бути вибрано в ISU, INU та DDC. У DSU напруга постійного струму природним чином регулюється напругою живлення та навантаженням. Потужність мережі, як активна, так і реактивна, регулюється відповідними контролерами зниження напруги. Докладний опис управління потужністю мережі доступно в керівництві по застосуванню Hybrid vessel – Optimal grid control (3AXD10001372553). Управління напругою постійного струму INU описано в керівництві по програмному забезпеченню основного управління ACS880 (3AUA0000085967).

Управління режимом

Режими роботи різних компонентів SGD (INU, ISU і т. д.) не включено у ACS 880 SW, але повинні контролюватися системами автоматизації верхнього рівня, або PMS. В цьому підрозділі наведено рекомендації щодо безпечного переходу між режимами. На малюнку 18 показано режими і пропонувані безпечні переходи від одного до іншого. На малюнку представлені всі можливі доступні режими, але режимами, які не використовуються в конкретному перетворювачі, можна знехтувати. Режим очікування - це безпечний перехідний режим, при якому SNC ISU знаходиться у режимі керування постійним струмом, а перетворювач RMC зупинений. Всі переходи в режим повинні виконуватися при відсутності

навантаження і струму в перетворювачі. Розташування автоматичних вимикачів представлено на рисунку 19, а стан автоматичних вимикачів показано в таблиці 3.

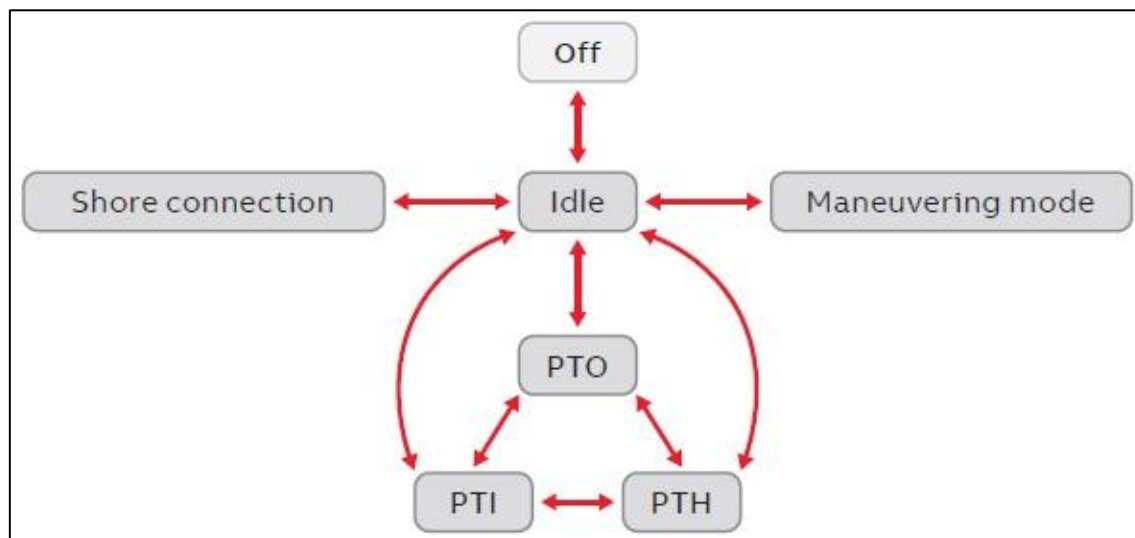


Рис. 18 – Управління режимом

В цій таблиці показано різні комбінації вимикачів у відповідних режимах.

Таблиця. 3: Режими і автоматичні вимикачі

Mode	SNC				RMC			
	Q1	Q2	ISU	INU	Q3	Q4	ISU	INU
Off			ISU+DC control+off	Router			Router	INU off
Idle	X		ISU+DC control+RdyRun	Router			Router	INU RdyRun
PTO	X		OGC Run	Router	X		Router	INU+DC control Run
PTH	X		ISU+DC control Run	Router	X		Router	INU Run
PTI	X		ISU+DC control Run	Router	X		Router	INU Run
Maneuver		X	Router	INU	X		Router	INU+DC control Run
Shore	X		OGC Run	Router		X	ISU+DC control Run	Router

В якості прикладу велика система з валогенератором в режимі маневрування та підключенням до берега з відповідними автоматичними вимикачами представлена на рис.19. Таблиця 3 ілюструє різні комбінації цих вимикачів у відповідних режимах. Вона також ілюструє режим керування відповідним перетворювачем. Режими INU описані в керівництві по прошивці програми основного управління ACS880 (3AUA0000085967), а режими ISU описані в керівництві по прошивці програми керування живленням IGBT ACS880 (3AUA0000131562).

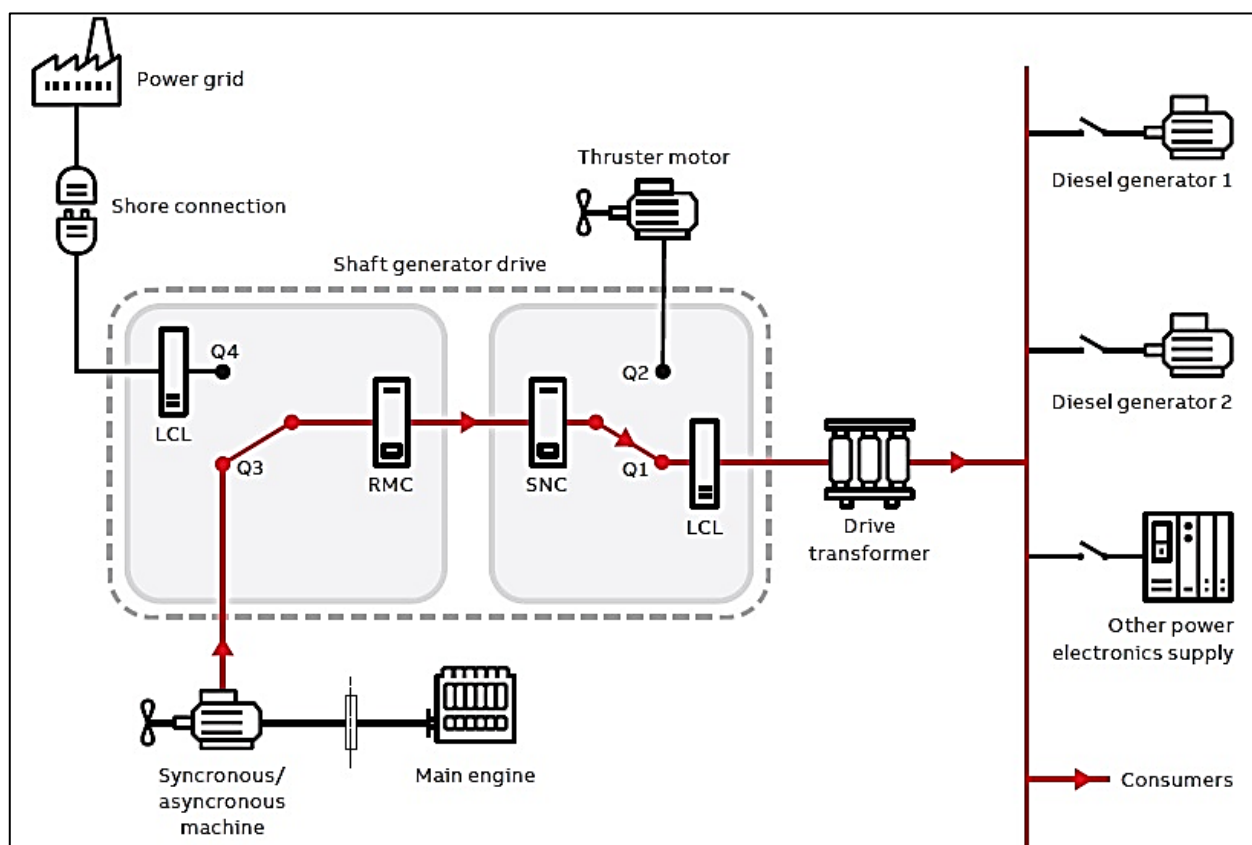


Рис. 19 - Управління режимом за допомогою вимикачів

Вибір компонента

З допомогою ACS880 multidrive з повітряним і рідинним охолодженням можна створити повноцінну систему SGD. При невеликих розмірах модулів (модулів з блоком управління ZCU) управління SM, OGC і режим маршрутизатора (режим, що використовується для гарячої заміни плати управління) неможливі. Для режиму маневрування із звичайним HW потрібно INU + режим маршрутизатора і дві плати BCU. Для деяких функцій, таких як управління SM, OGC і режим маршрутизатора, потрібен блок управління BCU. Деякі функції, такі як режим маневрування і використання RMC в якості перетворювача "берег-судно", не потребують використання двох блоків управління BCU.

Вибір типу компонента

Вибір типу суднового мережного перетворювача (SNC) і коефіцієнта передачі трансформатора

Такі аргументи впливають на вибір SNC-перетворювача і на необхідний коефіцієнт передачі трансформатора:

- Чи є потреба у підтримці системи захисту від короткого замикання в мережі?
- Потрібна можливість створювати мережу?
 - Якщо потрібна одна або обидві функції, ISU в режимі OGC є єдиним вибором для SNC converter.
- Який коефіцієнт короткого замикання?
 - Коефіцієнт короткого замикання повинен бути > 1 для забезпечення стабільної роботи ISU в режимі керування постійним струмом і в режимі регулювання потужності.
- Чи є необхідність в реактивній потужності?
 - Здатність виробляти реактивну потужність вимагає значного запасу напруги, що зазвичай призводить до необхідності в трансформаторі. Резерв напруги - це різниця між максимальною напругою змінного струму, що може бути вироблено, і номінальною напругою мережі живлення. Резерв напруги необхідний для компенсації перепадів напруги, викликаних індуктивним струмом.
- Чи є потреба в компенсації гармонік?
 - Для цієї функції також потрібен додатковий резерв напруги. Компенсація гармонік доступна в режимі OGC.
- Який рівень напруги постійного струму?
 - Напруга постійного струму повинна бути достатньо високою для формування бажаної напруги змінного струму, але рекомендується передбачити деякий запас на випадок перехідних процесів, викликаних різкими змінами навантаження. Рекомендоване значення $U_{DC} = 1,45 * U_N$, де U_N - номінальна напруга перетворювача. Можна встановити рівень напруги вище цього, але рекомендується дотримуватися більш консервативних величин, щоб уникнути надмірного навантаження на конденсатори постійного струму при перехідних процесах в мережі. Крім того, рідкісний одночасний вихід з ладу RMC і SNC призведе до збільшення напруги постійного струму за рахунок відведення

магнітної енергії індуктивностей розсіювання машини на конденсатори постійного струму через діоди вільного ходу. При більш високих напругах постійного струму слід розглянути можливість використання приривача для запобігання перенапруги в ланцюзі постійного струму.

- Яка потрібна напруга мережі?
- Необхідна напруга мережі безпосередньо впливає на необхідний запас напруги.

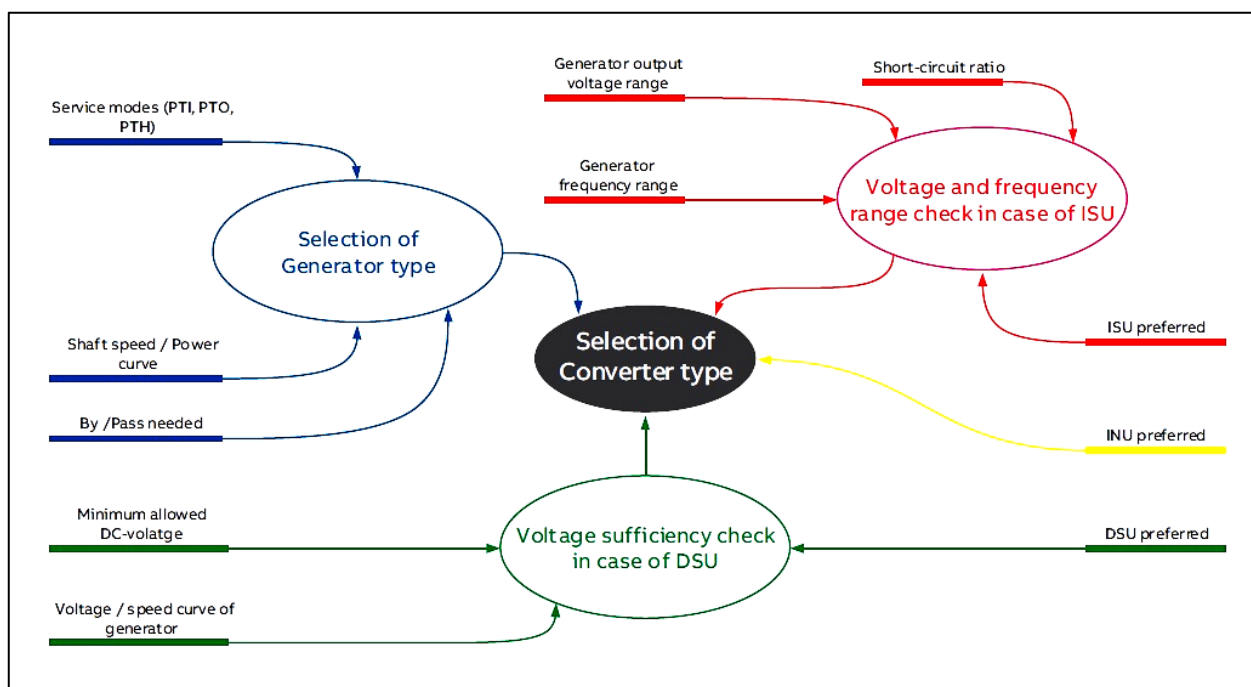


Рис. 20 – Вибір типу перетворювача

Вибір типу перетворювача обертальної машини (RMC)

На вибір перетворювача впливає тип генератора, а також обмеження ISU і DSU (в залежності від того, яке рішення краще). При виборі типу генератора слід враховувати навантажувальну здатність на низьких обертах само-вентильованих машин, а також недостатній пусковий момент синхронних машин з намагнічуванням AVR в режимі РТН (див. розділ 5). У разі, якщо кращим рішенням є ISU, необхідно перевірити діапазони частоти і напруги, а також ступінь короткого замикання. (Додаткова інформація у розділі 5).

У разі, якщо переважним типом перетворювача є DSU, важливо перевірити достатність напруги генератора у всій робочій зоні. (Більш детальна інформація наведена у розділі 5).

Обхід(байпас)

Вибір компонентів для обходу в режимах РТО, РТІ і РТН має деякі суттєві відмінності. В режимі відбору потужності асинхронної машини зазвичай недостатньо через труднощі з керуванням, які описані в розділі 3.1. Деякі великі машини можна запустити без будь-якого зовнішнього пристрою, що зменшує подачу струму в мережу. Проте зазвичай їх запускають шляхом зменшення пускового струму одним з наступних методів:

1. Використання пристрою плавного пуску
2. Використання автотрансформаторного пускача
3. Приводячи його в рух синхронно з двигуном
4. Розгін машини з допомогою частотного перетворювача

Перший і другий методи природним чином синхронізовані і не вимагають якого-небудь зовнішнього блоку синхронізації. Третій метод вимагає синхронного блоку і відповідних вимірювань. Четвертий спосіб вимагає затримки розмагнічування на пару секунд між відключенням перетворювача та підключенням мережного вимикача. В особливих випадках можлива синхронізація мережі з виходом перетворювача частоти (виконується до переривання синхронізації), але необхідно виключити ризик відключення через пульсації струму.

Придатність машини для вибраного методу запуску повинна бути перевірена у постачальника машини.

Визначення розмірів компонентів

Основні принципи

Вимоги до струмів короткого замикання через їх реактивну природу зазвичай визначають розміри SNCISU. Реактивна складова струму короткого замикання подається від ISU, а активна складова - від генератора через INU і ланцюг

постійного струму. Розміри перетворювача RMC визначаються струмом генератора при максимальному навантаженні.

Вплив типу охолодження

Охолоджуючий вентилятор електричної машини може працювати або окремо від власного двигуна (зовнішнє охолодження), або бути вбудований в вал ротора (само-вентильований). Коли електрична машина охолоджується ззовні, її максимальний постійний струм залишається постійним. Для само-вентильованих машини потужність охолодження залежить від швидкості машини. Отже, максимальний довготривалий струм обмежений при роботі на низькій швидкості. Потужність охолодження залежить від діаметра і частоти обертання вентилятора. Через ці обмеження ефективне само-охолодження можливо тільки при більш високих частотах обертання вала, а розміри охолодження зазвичай визначаються в залежності від номінальної частоти обертання. Ослаблення охолодження нижче номінальної швидкості обмежує максимальну здатність машини до безперервному завантаженні, як показано на рис. 21.

Примітка: перетворювачі частоти не можуть контролювати перегрів машини, якщо він викликаний слабкою вентиляцією. Відповідальність за те, щоб машина не перегрівалася, лежить на користувачі. Потрібне обмеження струму залежить від конструкції машини, і різні типи машин можуть мати різні криві теплового обмеження струму. На малюнку 21 показано вплив системи охолодження на потужність. На малюнку не показана мінімальна межа частоти, яка зазвичай встановлюється на рівні 20% від номінальної частоти або вище, залежно від конструкції основного двигуна. Як видно з малюнків, теоретична потужність машини при низькій швидкості дуже обмежена, і робота на такій швидкості зазвичай не вигідна. Механічні розміри двигуна визначаються розміром його магнітопроводів (залізних деталей) і простором, необхідним для обмоток. Економічна конструкція машин заснована на максимальному використанні магнітної проникності залізних деталей, встановлюючи щільність магнітного потоку як можна ближче до рівня насичення без шкоди для продуктивності. Кількість витків обмотки також впливає на фізичний розмір двигуна. Однак можна

припустити, що воно однаково незалежно від обраного методу охолодження, і, таким чином, при даному порівнянні його впливом нехтують. Потік статора може бути виражений як напруга статора при електричній кутовій частоті ($\psi_s = \frac{U_s}{\omega}$). Перетворювачі частоти зазвичай підтримують потік в апараті на номінальному значенні, коли це можливо. Це призводить до лінійного збільшення напруги пропорційно частоті. Потік статора починає зменшуватися при досягненні максимальної напруги, а частота обертання продовжує збільшуватися. Частота, з якою потік починає зменшуватися, називається "точкою ослаблення поля".

На практиці точка ослаблення поля і максимальний струм визначають механічні розміри машини. У прикладі, показаному на малюнку 21, максимальна вихідна потужність однакова для обох машин. Обмежений охолодження в само-вентилюваній машині (малюнок b) забезпечує максимальне навантаження тільки на швидкостях у верхній частині робочої зони. Щоб машина з зовнішнім охолодженням могла видавати ту ж потужність, що і машина з само-вентиляцією, розміри машини з само-вентиляцією повинні бути більше на 20% або більше.

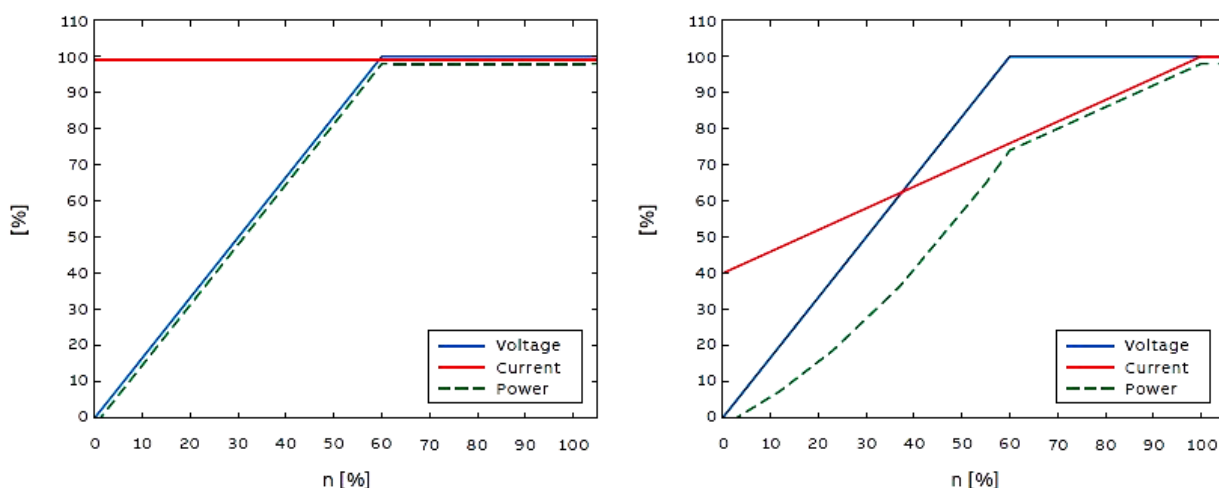


Рис. 21 - Криві струму, напруги і потужності машин з зовнішньою само вентиляцією

Визначення розмірів перетворювача оберտальної машини (RMC)

Вибір розмірів залежить від вибраного типу перетворювача. У цьому розділі представлений огляд кожного з доступних варіантів.

ISU. Інструкції щодо визначення розмірів ISU наведені в посібнику по вбудованому програмному забезпеченню програми керування живленням IGBT ACS880 (3AUA0000131562). Зменшення потужності. На низьких частотах амплітуда напруги генератора значно нижче амплітуди напруги постійного струму, що призводить до так званого підвищення напруги. Підвищення викликає додаткове теплове навантаження на ISU і LCL, що вимагає зниження потужності ISU. Інструкції щодо зниження посилення наведені в керівництві з програмного забезпечення програми керування живленням IGBT ACS880 (3AUA0000131562).

INU. При визначенні розмірів RMC-INU використовується процедура, аналогічна до процедури визначення струму навантаження в традиційному електроприводі. В деяких системах застосування валогенераторів необхідно знизити потужність приводу. При визначенні розмірів приводу рекомендується використовувати інструмент для визначення розмірів DriveSize. Максимальні струми і правила зниження наведені в керівництві з обладнання приводних модулів ACS880-04 (від 200 до 710 кВт, від 250 до 700 л. с.) (3AUA0000128301) і керівництві по обладнанню інверторних блоків ACS800-107 (3AUA0000102519).

Синхронні машини з зовнішнім збудженням вимагають використання окремого блоку збудження (EXU). Інструкції щодо визначення розмірів EXU доступні в керівництві по застосуванню системи управління синхронною машиною (3AXD50000373581).

DSU. У DSU напруга постійного струму відповідає напрузі мережі. Для 12-імпульсного випрямляча рівень напруги постійного струму при повному навантаженні становить $1,40 \times U_{grid}$, що означає, що пульсації дуже низькі. При використанні шестімпульсного випрямляча необхідно враховувати пульсацію, як описано в розділі 3.3.

Необхідні дані для вибору правильного блоку живлення діодів наведені в керівництві з обладнання модулів живлення діодів ACS880-304+A018 (3AXD50000010104).

SNC-перетворювач

OGC ISU. Інструкції щодо визначення розмірів наведено в додатку ACS880 multidrive, Оптимальне управління мережею (опція + N8053) додаток (3AXD50000220717). Вибір напруги постійного струму визначає номінальну напругу OGC. Вибрана напруга постійного струму повинно бути така же висока, як амплітуда напруги живлення і необхідний запас напруги, або перевищувати її.

Нижче перераховані основні явища, які потребують додаткового резерву напруги, або, іншими словами, більш низького змінного напруги при тому ж постійній напрузі:

- Необхідність компенсації гармонік
- Компенсація дисбалансу струму
- Потреба в реактивній потужності (вплив напруги)

Вимоги до напруги переднього трансформатора для OGC представлені в керівництві по застосуванню Hybrid vessel – Optimal grid control (3AXD10001372553), в якому також представлена основа для визначення розмірів OGC ISU.

Низька напруга живлення і висока температура навколишнього середовища або охолоджуючої рідини вимагають зниження температури ISU. Однак, як правило, розміри SNC ISU розраховані на захист від короткого замикання, що призводить до збільшення розмірів перетворювача, які виявляються настільки великими для нормальної роботи, що немає необхідності в додатковому збільшенні розмірів через збільшення температури.

Однак вимоги, що пред'являються до пускового струму двигунів DOL, в деяких випадках можуть бути вище необхідного струму короткого замикання. Якщо пусковий струм під час запуску в цьому режимі перевищує поточний межа OGC ISU, час запуску двигуна збільшиться, і в гіршому випадку двигун не зможе бути запущений, але перетворювач відключиться через заданий час після активації захисту по струму.

ISU в режимах керування постійним струмом і потужністю

При визначенні розмірів ISU рекомендується використовувати інструмент DriveSize. Інструкції можна знайти в керівництві по обладнанню блоків живлення ACS880-207 IGBT (3AUA0000130644). У цих режимах визначення розмірів є простим. Блок живлення ISU повинен бути достатньо великим, щоб забезпечувати необхідну споживану потужність мережі.

Необхідна удавана потужність складається з двох компонентів:

- Реактивна потужність, створювана ISU
- Активна потужність, що створюється генератором і передається по шині постійного струму.

Передача реактивної потужності від генератора до ISU фізично неможлива, оскільки шина постійного струму може передавати тільки активну потужність. Якщо потрібна подача реактивного струму, падіння напруги в LCL та приводному трансформаторі повинно бути компенсовано більшим запасом напруги.

Зниження потужності ISU потрібне, якщо очікується використання функції підвищення(Boost), висока температура навколишнього середовища або охолоджуючої рідини.

INU. В режимі маневрування перетворювач SNC управляється за допомогою керуючого програмного забезпечення INU. Розміри INU в цьому режимі не відрізняються від розмірів INU для будь-якого іншого електроприводу. Для визначення розмірів рекомендується використовувати програмне забезпечення DriveSize. Якщо рекомендований розмір для INU відрізняється від результатів визначення розмірів ISU, розмір перетворювача визначається більшим розміром. Керівництво по обладнанню інверторних блоків ACS880-107 (3AUA0000102519) встановлює певні вимоги до мінімального розміру двигуна, яким може управляти INU, в основному через дозвіл вимірювань і допустимої області параметрів.

Щоб уникнути проблем на етапі введення в експлуатацію, необхідно дотримуватися цих правил. У більшості випадків для роботи OGC ISU потрібен більший струм, ніж для INU, через вимоги до короткого замикання і тривалого

запуску, а визначення розмірів INU може бути обмежено перевіркою мінімально допустимого розміру двигуна.

Обхід(байпас)

Визначення розмірів байпаса проводиться у відповідності з традиційними принципами електротехніки і в даному керівництві ігнорується.

Перенапруга при зупинці машини РМ. Як пояснюється, перенапруга при зупинці приводу машини РМ повинен припинятися за допомогою гальмівного резистора. Причиною необхідності використання гальмівного резистора є те, що ні ЕРС, ні енергія індуктивності не можуть перевищувати рівень відключення перетворювача від перенапруги. Для отримання додаткової інформації див. Керівництво по вбудованому програмному забезпеченню основної керуючої програми ACS880 (3AUA0000085967).

$$\sqrt{2}emf < U_{Dctrip}$$

$$U_{DC1} = \sqrt{\frac{3L_S \cdot I_S^2}{C} + U_{DC0}^2}$$

Змінні в рівнянні обговорюються в підрозділі 3.6.4.

Розмір приводу

DriveSize - це інструмент, призначений для визначення розмірів приводів АВВ. Він містить поточні версії каталогів двигунів і приводів АВВ. Програма вибирає рекомендований розмір приводу на основі заданих вхідних даних. Доступні дві версії DriveSize:

- DriveSize Web, який представляє собою онлайн-версію
- Програмне забезпечення DriveSize, що являє собою версію для ПК.

Супутні документи АВВ:

Інструкції з техніки безпеки для шаф і модулів ACS880 multidrive 3AUA0000102301

Многодвигательные шафи і модулі ACS880 з рідинним охолодженням інструкції по техніці безпеки 3AXD50000048633

Інструкції по електричному проектуванню багатодвигунних шаф і модулів ACS880 3AUA0000102324

Інструкції по електричному планування багатодвигунних шаф і модулів ACS880 з рідинним охолодженням 3AXD50000048634

Інструкція з механічною встановленні шаф з декількома приводами ACS880 3AUA0000101764

Інструкції з механічною установці багатодвигунних шаф з рідинним охолодженням ACS880 3AXD50000048635

Інструкції по проектуванню і виготовленню шафи для багатодвигунних модулів ACS880 з повітряним і рідинним охолодженням 3AUA0000107668

Оптимальне мережеве управління живленням ACS880 IGBT додаток до програми керування живленням 3AXD50000164745

Керівництво по обладнанню модулів живлення IGBT ACS880-204 для блоків з повітряним охолодженням 3AUA0000131525

Керівництво по обладнанню IGBT-модулів живлення ACS880-204LC для пристроїв з рідинним охолодженням 3AXD50000284436

Керівництво користувача блоку рідинного охолодження ACS880-1007LC 3AXD50000129607

Керівництво по програмному забезпеченню програми керування живленням IGBT ACS880 3AUA0000131562

Керівництво по обладнанню блоків живлення IGBT ACS880-207 3AUA0000130644

Блок синхронізації RSYC-01 для приводів ACS580 і ACS880 керівництво користувача 3AFE68827370

Керівництво по прошивці основної керуючої програми ACS880 3AUA0000085967

Керівництво по обладнанню інверторних блоків ACS880-107 3AUA0000102519

Приводні модулі ACS880-04 (від 200 до 710 кВт, від 300 до 700 л. с.) керівництво по обладнанню 3AUA0000128301

Керівництво по застосуванню системи оптимального управління гібридним судном 3AXD10001372553

Керівництво по застосуванню системи управління синхронною машиною
ACS880 3AXD50000373581

3. МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ (PMSG)

3.1. Математична модель генератора

На рис. 3.1 показано функціональну схему валогенераторної системи з PMSG, де такі позначення:

- ME – Головний двигун;
- PMSG – Синхронний генератор на постійних магнітах;
- AR – Активний випрямляч;
- ARC – Активна система керування випрямлячем;
- C – конденсатор постійного струму.

Електромагнітні процеси в системі досліджуються на основі еквівалентної схеми заміщення. Схема представлена на рис. 3.2 [6].

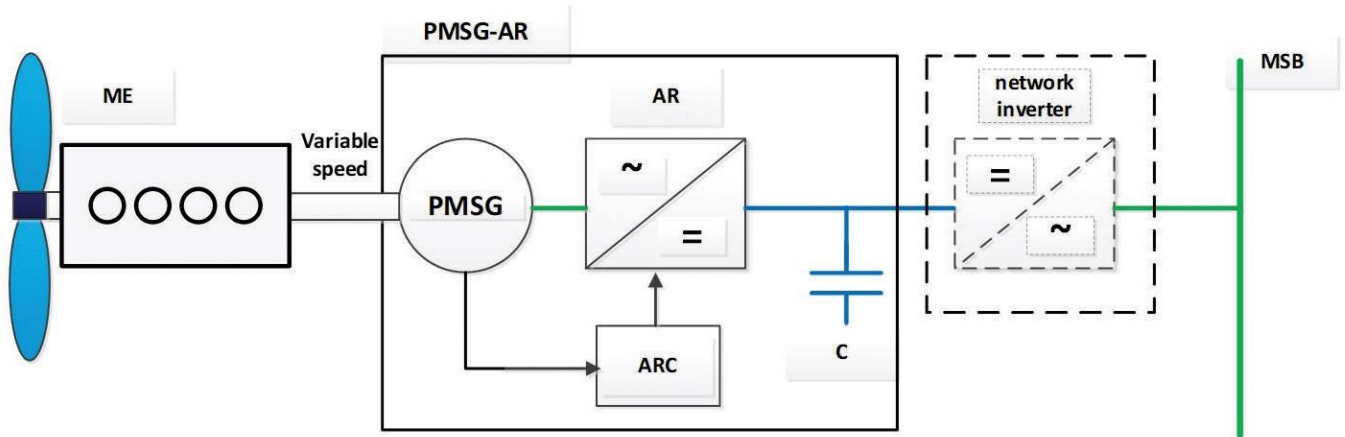


Рис. 3.1 – Блок діаграма валогенераторної системи з PMSG

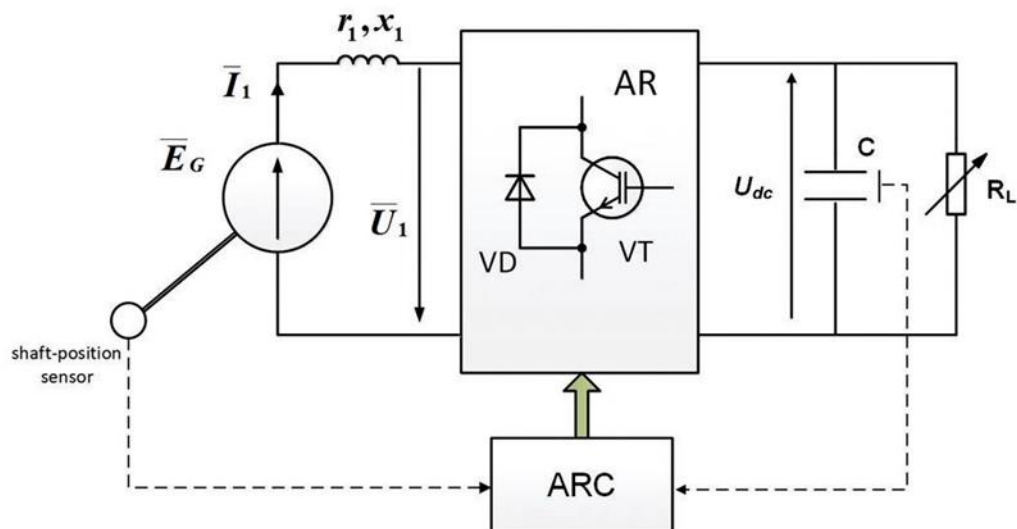


Рис. 3.2 – Еквівалентна схема PMSG

У цій еквівалентній схемі (рис. 3.2.) AR представлений керованим джерелом напруги (U_1), який підключений паралельно до обмоток статора PMSG з E_1 . Внутрішніми параметрами машини є індуктивний та активний опір у схемі

заміщення. Математичний опис PMSG здійснено в синхронно обертовій системі координат (x, y) за допомогою методу узагальненого (результуючого) вектора [9, 12, 16] та методу «головної складової» [3, 8]. Цей математичний опис виглядає так:

$$\bar{E}_G(t) = \bar{U}_1(t) + L_1 \frac{d\bar{I}_1(t)}{dt} + r_1 \bar{I}_1(t) + jx_1 \bar{I}_1(t) \quad (3.1)$$

Де:

$\bar{E}_G(t) = j\bar{\psi}_0 \omega(t)$ - просторовий вектор електрорушійної сили (ЕРС) на обмотках статора;

$\bar{U}_1(t)$ - просторовий вектор напруги в колі змінного струму;

$\bar{I}_1(t)$ - просторовий вектор струму в обмотках статора;

r_1, L_1 – опір та індуктивність машини;

$x_1 = \omega L_1$ – реактивний опір машини;

ω - кутова частота напруги PSC

Нижче розглядається спосіб керування машиною, при якому джерелом керуючого струму виступає активний випрямляч. Подібний аналіз був проведений для PMSG з параметрами, представленими в таблиці 3.1:

Таблиця 3.1 Параметри PMSG

Параметр	Символ	Одиниця	значення
Номінальна фазна напруга	U_n	V(rms)	220
Опір обмотки якоря	r_s	Ohm	0.05
Поздовжня індуктивність якоря	L_d	mH	0.635
Поздовжня індуктивність якоря	L_q	Mh	0.635
Число пар полюсів	p	-	4
Кіль-сть фаз	m	-	3

У повернутій системі координат d-q (d - фактична вісь, q - уявна вісь) рівняння (3.1) представлено у вигляді:

$$\begin{aligned}
 0 &= U_d(t) + L \frac{dI_d(t)}{dt} + r_1 I_d(t) - x_1 I_q(t), \\
 E_1 = E_q &= U_q(t) + L \frac{dI_q(t)}{dt} + r_1 I_q(t) + x_1 I_d(t), \\
 U_d(t) &= \frac{mU_{dc}(t)}{2} \sin \varphi_m,
 \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$U_q(t) = \frac{mU_{dc}(t)}{2} \cos \varphi_m.$$

Для повного опису систему рівнянь (3.2) слід доповнити рівнянням балансу енергії та рівнянням Кірхгофа в колі постійного струму.

$$\begin{aligned} \frac{3}{2} E_q I_q(t) &= U_{dc}(t) * I_{dc}(t) + \frac{3}{2} r_1 (I_d^2(t) + I_q^2(t)), \\ C \frac{dU_{dc}(t)}{dt} &= I_{dc}(t) - I_L(t) = I_{dc}(t) - \frac{U_{dc}(t)}{R_L} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Де:

C – конденсатор в колі постійного струму

R – опір навантаження

Основні фізичні властивості розглянутої системи можна знайти без розв'язку диференціальних рівнянь (3.2, 3.3), враховуючи лише усталені режими роботи. У усталеному режимі системи рівнянь (3.2, 3.3) перетворюються у вигляд:

$$\begin{aligned} 0 &= U_d + r_1 I_d - x_1 I_q, \\ E_1 &= U_q + r_1 I_q + x_1 I_d, \\ U_d &= \frac{mU_{dc}}{2} \sin \varphi_m, \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} U_q &= \frac{mU_{dc}}{2} \cos \varphi_m. \\ \frac{3}{2} E_q I_q &= U_{dc} I_L + \frac{3}{2} r_1 (I_d^2 + I_q^2), \quad (3.5) \\ I_L &= \frac{U_{dc}}{R_L} \end{aligned}$$

Рівняння (3.4, 3.5) дозволяють розрахувати вихідну напругу AR при зміні коефіцієнта модуляції m і фази модуляції φ_m .

3.2. Електромагнітні та енергетичні характеристики PMSG

У математичному описі (3.4, 3.5) вектори змінних стану використовуються у векторній діаграмі для оцінки електромагнітних та енергетичних властивостей PMSG. При побудові векторної діаграми за рівняннями (3.4, 3.5) електромагнітні процеси в PMSG розглядаються в обертовій системі координат (d,q), пов'язаній з конструкцією машини [9, 12, 16], а електромагнітні процеси в AR – в обертовій системі координат x,y, пов'язаній з напругою та струмом у навантаженні. При цьому вектор потоку $\bar{\psi}_0$ поєднується з нульовим станом датчика положення ротора (ДПР) і спрямований вздовж дійсної осі (d), що обертається зі швидкістю системи координат. У цьому випадку обертання ЕРС $E_1 = j\bar{\psi}_0 \dot{\gamma}$ випереджає $\bar{\psi}_0$ на 90 градусів і буде спрямоване вздовж уявної осі q. Тому при побудові векторної діаграми необхідно враховувати те, що напрямки одного з векторів стану (напруги

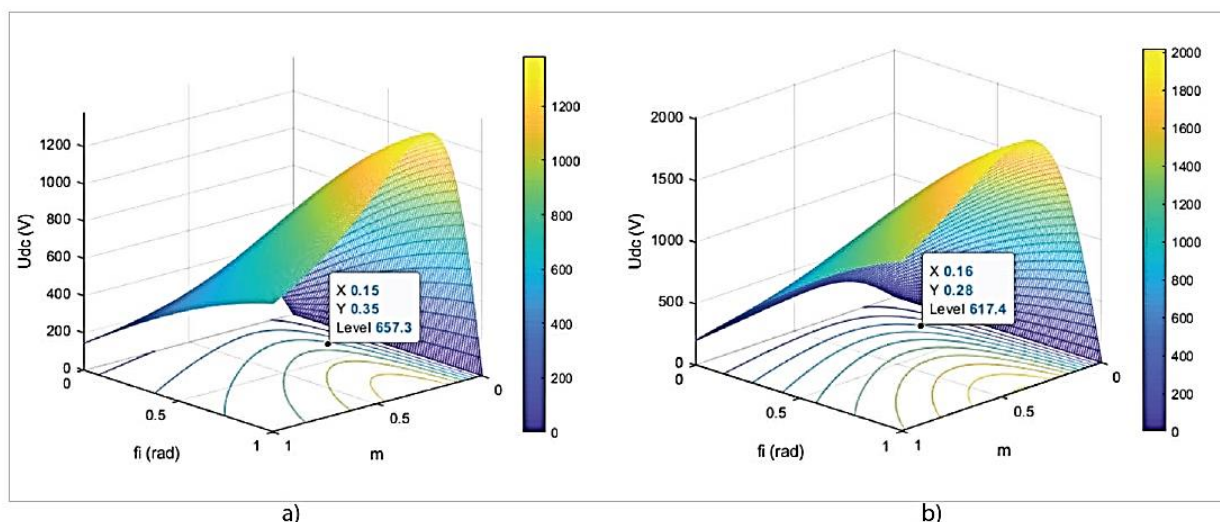


Рис. 3.4 – Вихідна напруга AR на коефіцієнті модуляції (m) та фазі модуляції (f_i) для двох швидкостей вала машини (a) 100 рад/с і 150 рад/с (b)

Проекції цих поверхонь на основну площину є лініями постійної напруги на виході AR. Області допустимих значень коефіцієнта модуляції та фази модуляції лежать вище заданих значень вихідної напруги AR. Якщо силовий напівпровідниковий перетворювач використовує керування струмом [2, 8], сигналами керування є струми I_d^* та I_q^* , поздовжня і поперечна складові напруги визначаються з рівнянь:

$$\begin{aligned} U_d &= -r_1 I_d^* + x_1 I_q^*, \\ U_q &= -r_1 I_q^* - x_1 I_d^* + \psi_0 \omega. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Енергетичні характеристики PMSG розраховуються за рівняннями:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{3}{2} (U_d I_d^* + U_q I_q^*), \\ Q_1 &= \frac{3}{2} (U_q I_d^* - U_d I_q^*), \\ P_G &= \frac{3}{2} E_q I_q^*, Q_G = -\frac{3}{2} E_q I_d^* \end{aligned} \quad (3.8)$$

На рис. 3.5 наведено результати розрахунку енергетичних характеристик, які представлені залежностями активної та реактивної потужності на виході PMSG від сигналів керування. Проекції поверхні потужності на головну площину являють собою залежності між цими керуючими сигналами, при яких потужність постійна.

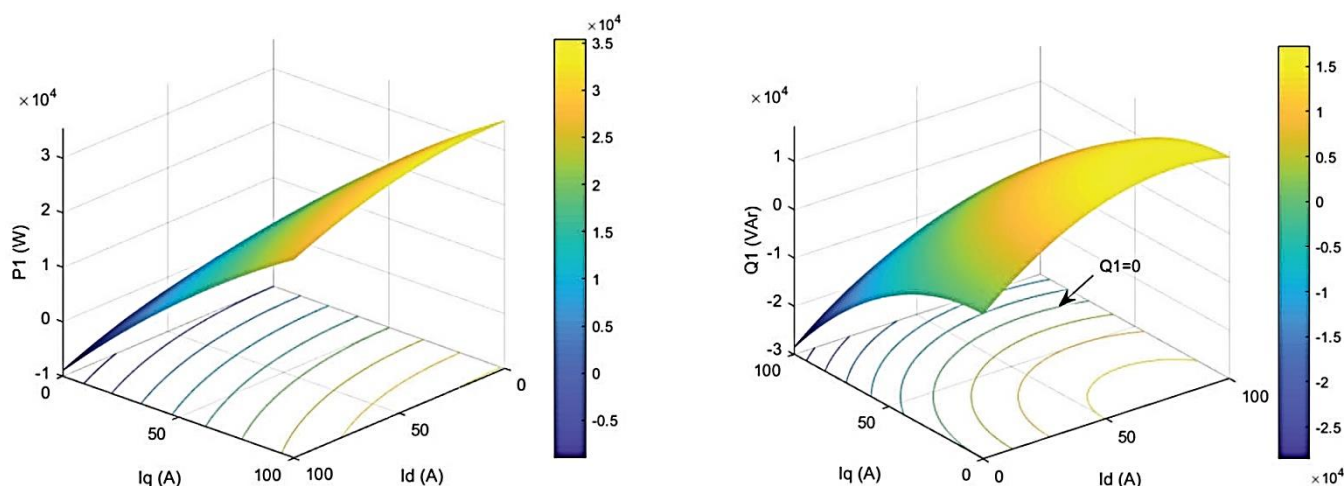


Рис. 3.5 - Енергетичні характеристики струмового керування PMSG

Отримані енергетичні характеристики струмового керування PMSG дозволяють оцінити властивості системи, які зводяться до наступного:

- активна потужність у навантаженні PMSG в генераторному режимі залежить в основному від складової струму I_q і незначною мірою від складової I_d ;
- реактивна потужність у навантаженні PMSG порівнянна з активною потужністю, що викликає збільшення повного струму і втрат у напівпровідникових AR і обмотках PMSG;
- для підтримки нульової реактивної потужності в навантаженні PMSG необхідно підтримувати певну нелінійну залежність між I_q і I_d ;
- діапазон зміни керуючого сигналу при нульовій реактивній потужності в навантаженні PMSG для обраної машини обмежений значенням $I_q \leq 70A$;
- при регулюванні тільки по активній складовій ($I_d = 0$) реактивна потужність у всьому діапазоні зміни I_q залишається від'ємною. В даному випадку AR для PMSG є активним ємнісним навантаженням.

3.3. Енергетичні характеристики оптимізованого валогенератора з PMSG

Для оптимального керування AR напруга та струм на виході PMSG збігаються по фазі (рис. 3.6). Тоді з геометричних побудов (рис.3 6) можна визначити поздовжню та поперечну складові струмів, при яких реактивна потужність на виході PMSG дорівнює нулю.

$$I_d^* = \frac{p\omega_m \Psi_0}{x_1} \sin^2 \varphi_m,$$

$$I_q^* = \frac{p\omega_m \Psi_0}{x_1} \sin \varphi_m \cos \varphi_m \quad (3.9)$$

Розрахунок енергетичних характеристик генератора при такому керуванні здійснюється за рівняннями (3.7, 3.8, 3.9). Розрахункова та побудована енергетична характеристика системи представлена на рис.3.7, з якого випливає, що:

- при збереженні залежності (3.9) реактивна потужність на виході PMSG дорівнює нулю у всьому діапазоні зміни керуючих сигналів;
- при збереженні залежності (3.9) можна підтримувати постійну активну потужність на виході PMSG при істотно нелінійній залежності між фазою модуляції та частотою обертання вала машини;
- зі збільшенням потужності на виході PMSG зменшується допустимий діапазон зміни сигналів керування.

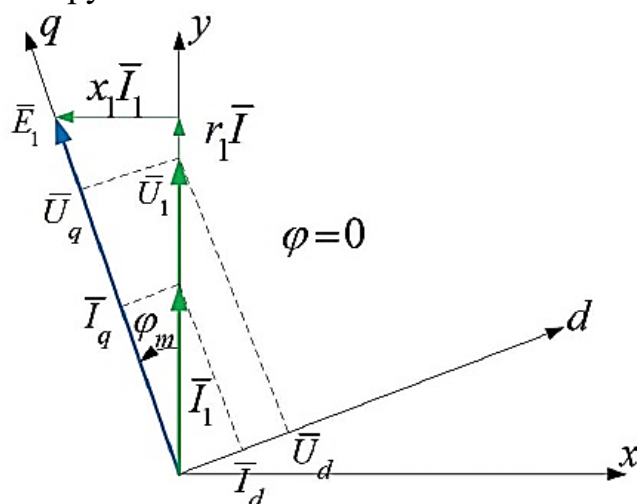


Рис. 3.6 – Векторна діаграма PMSG при відсутності реактивного навантаження

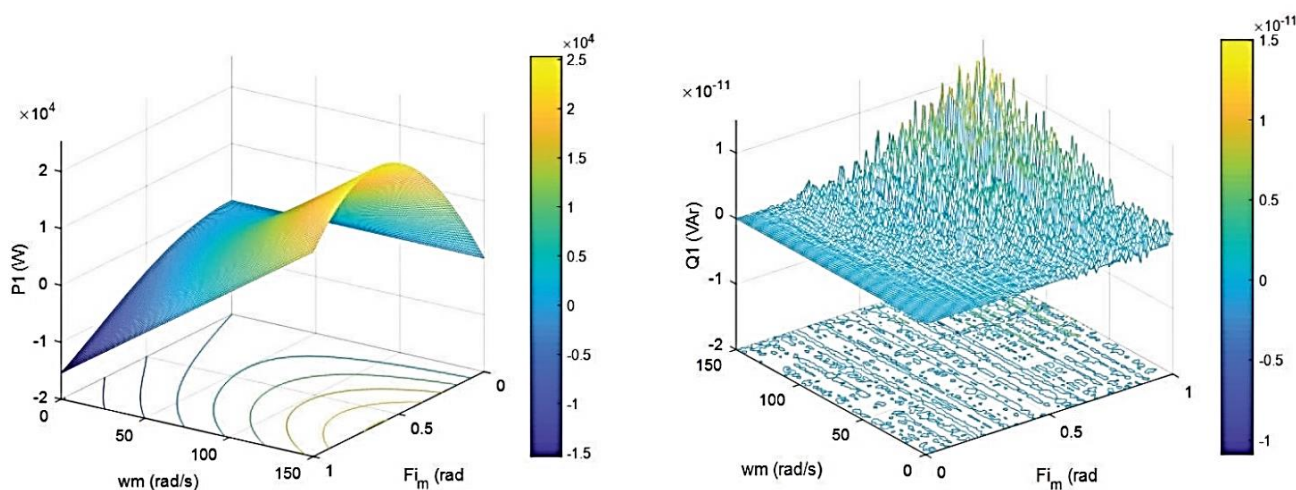


Рис. 3.7 – Оптимізовані енергетичні характеристики генератора

3.4. Моделювання PMSG

Експериментальне дослідження системи керування замкненим генератором проводилось у середовищі Matlab-Simulink. Модель генератора з PMSG наведена на рис. 3.8. У розглянутій конструкції двигун внутрішнього згоряння управляється

регулятором обертів. У цьому режимі задається частота обертання валу PMSG і головною вимогою до його електричної частини є підтримання постійної напруги в ланці постійного струму при зміні електричного навантаження. Стабілізація напруги здійснюється в класичній системі управління з ПІД-регулятором. Сигнал з виходу ПІД-регулятора подається на функціональні перетворювачі (Fcn6, Fcn7 – рис.3.8). У перетворювачах розраховуються опорні струми за рівнянням (3.9). Фаза модуляції визначається в блоці Fcn10 (рис. 3.8) за допомогою рівняння.

$$\varphi_m = \arctg \frac{U_d}{U_q} \quad (3.10)$$

Порівняно систему з незалежним регулюванням струму, яка описується рівнянням (3.4), і систему з оптимізованим керуванням струмом, яка описується рівнянням (3.5). На рис. 3.9 та рис. 3.10 наведено результати моделювання обох систем у перехідному та усталеному режимах роботи генераторної установки з ФПМГ. У усталеному режимі роботи під навантаженням в системі з незалежним регулюванням струму ($I_d^* = 0, I_q^* = var$) реактивна потужність PMSG становить приблизно третину активної потужності (рис. 3.9,а). В оптимізованій системі (рис. 10,а) спостерігаються короточасні зміни реактивної потужності в момент зняття навантаження. У стаціонарному режимі ця потужність практично дорівнює нулю.

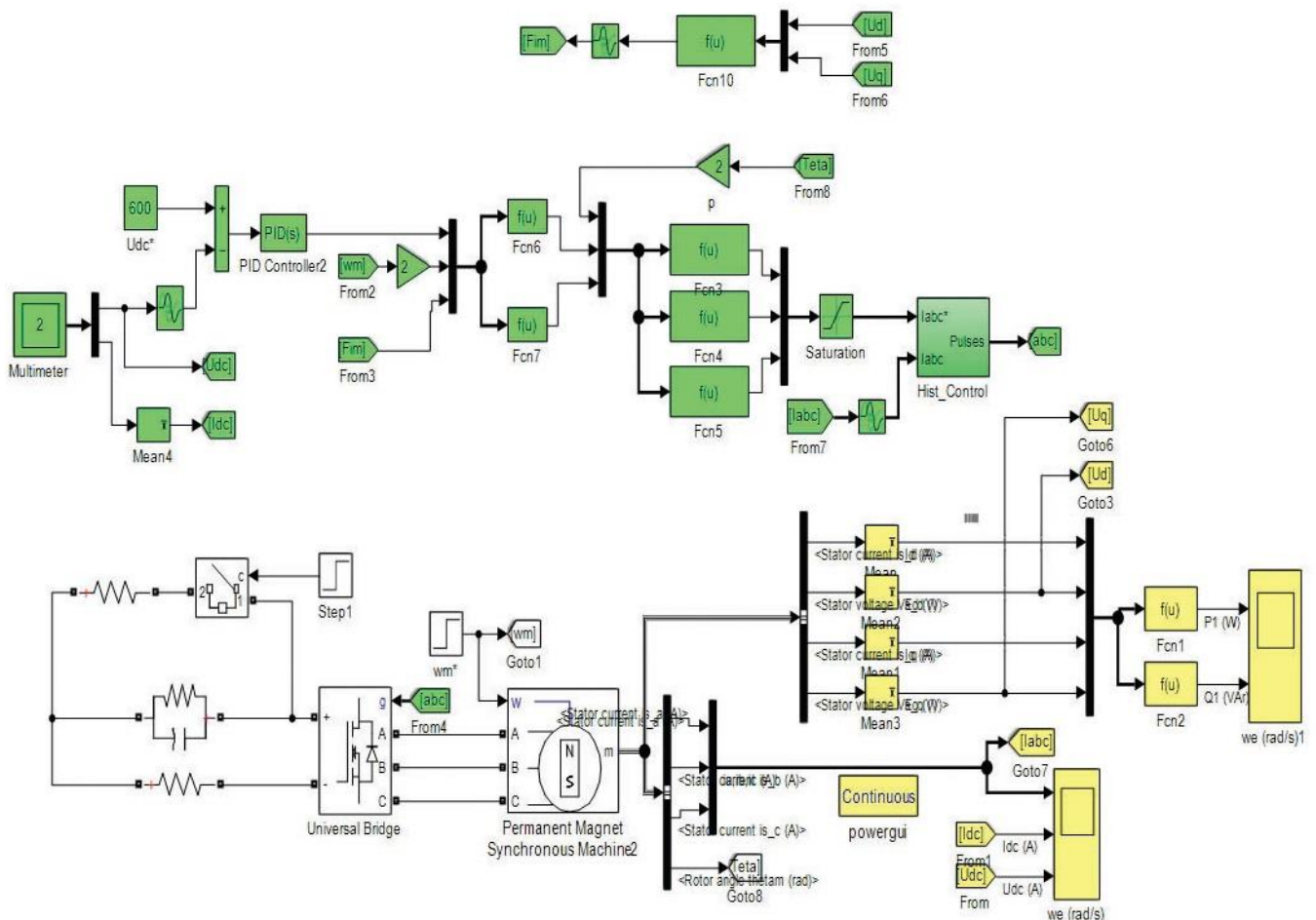


Рис. 3.8 – Модель валогенератора з PMSG

Електромагнітні процеси в обох системах показано на рис. 3.9,б, рис. 3.10,б, вони представлені струмами в статорі машини, струмом навантаження в ланці постійного струму AV (I_{dc}) і напругою в ланці постійного струму AV (U_{dc}).

Процеси, представлені на рис. 3.10, показують, що в оптимізованій системі зміна електричного навантаження генератора не впливає на напругу.

Криві (рис. 3.11, а, б) демонструють енергетичні та електромагнітні процеси в оптимізованій системі з PMSG при зміні частоти обертання вала генератора від 150 до 100 рад/с. Результати моделювання показують, що генераторна установка з PMSG забезпечує основні вимоги – підтримувати постійну напругу при зміні струму (потужності) у навантаженні та зміні швидкості обертання вала. Крім того, при оптимальному управлінні за рівнянням (3.5) реактивний струм в машині знижується до нуля, що зменшує втрати в активних опорах машини і активного випрямляча.

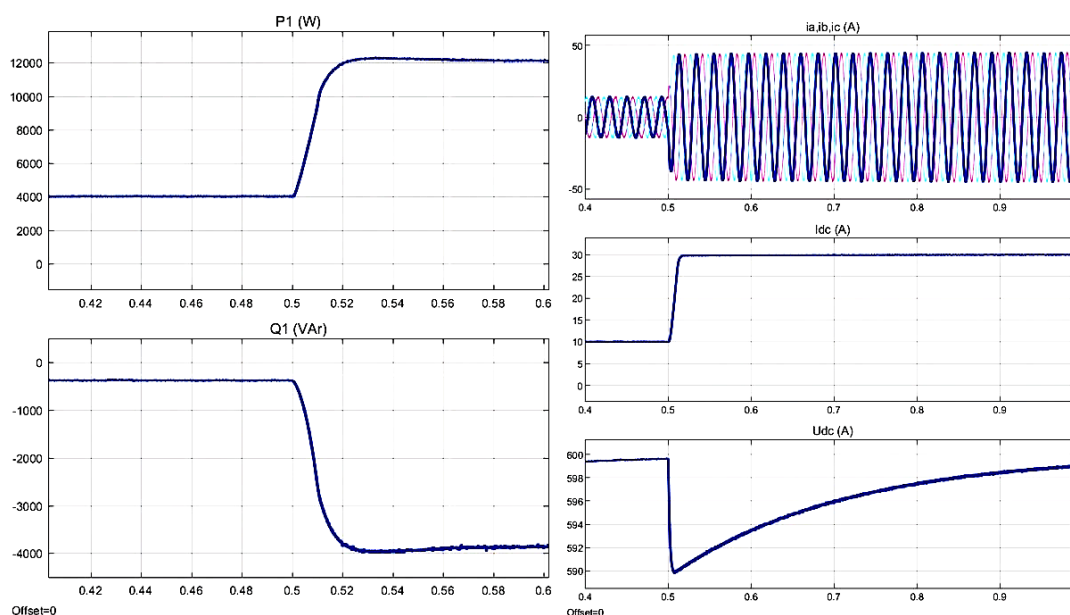


Рис. 3.9 – Перехідні енергетичні і електромагнітні процеси в неоптимізованій системі при зміні навантаження

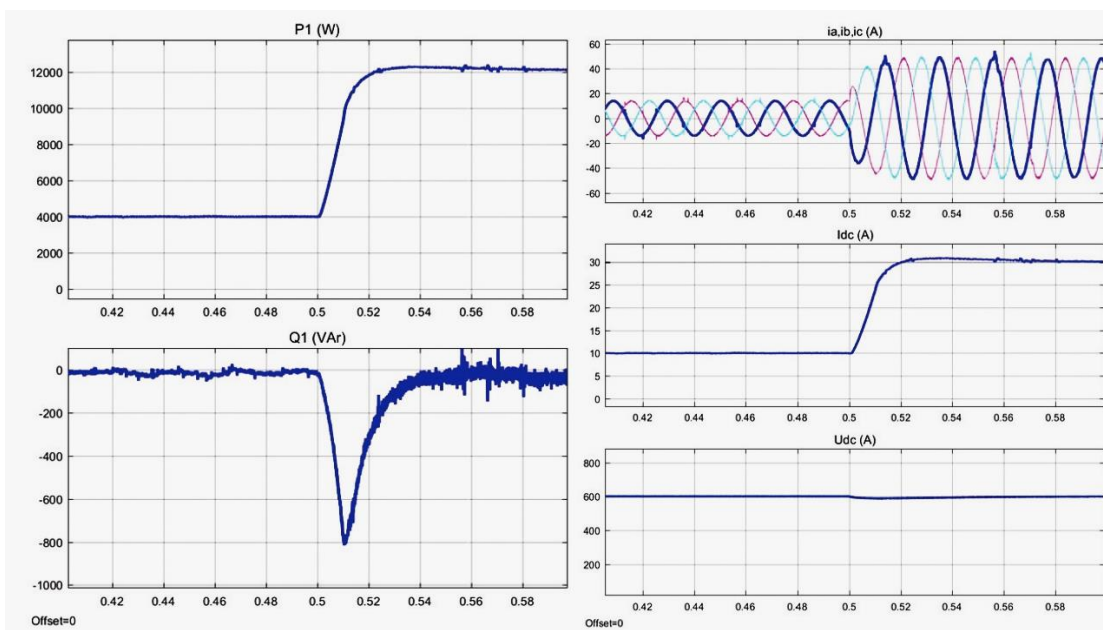


Рис. 3.10 – Перехідні енергетичні і електромагнітні процеси в оптимізованій системі при зміні навантаження

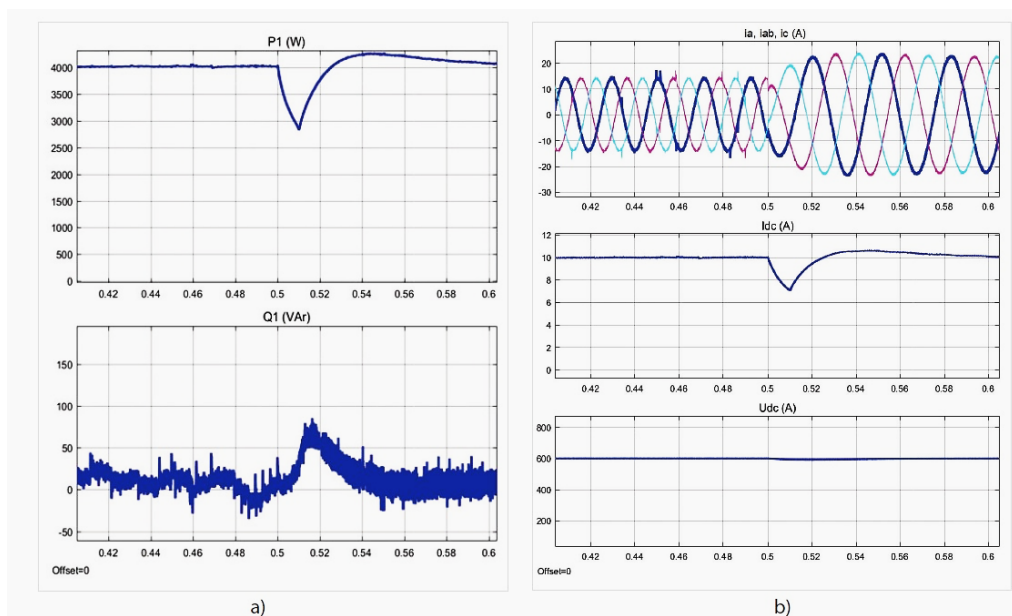


Рис. 3.11 – Перехідні енергетичні і електромагнітні процеси в оптимізованій системі при зміні швидкості PMSG

3.5. Висновок

Дослідження електромагнітних та електромеханічних властивостей в усталеному режимі системи PMSG-AR дозволило оцінити працездатність системи валогенератора при зміні частоти обертання валу та навантаження. Запропоноване керування AR дозволило оптимізувати систему валогенератора за рахунок зниження реактивної потужності в системі PMSG-AR. Реактивні струми i , відповідно, втрати в перетворювачі і машині можуть бути в кілька разів меншими при певному співвідношенні амплітуди і фази напруги (струму) на стороні змінного струму AR. Оптимізація енергетичних властивостей генераторних

установок набуває особливого значення при побудові потужних гібридних транспортних систем і систем з повною електричною тягою. Ці системи мають різні за потужністю джерела електричної енергії, що працюють на сумарному змінному навантаженні. Прикладами таких об'єктів є наземний, морський, річковий і повітряний транспорт, а прикладами таких джерел електричної енергії - дизель-генератори, валогенератори, паро- і турбогенератори, акумулятори, суперконденсатори та ін.

4. МОДЕЛЮВАННЯ, АНАЛІЗ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ВИПРЯМЛЯЧА ACTIVE FRONT END

У цьому розділі розглядається моделювання та комплексний аналіз випрямляча Active Front-End (AFE). Особливий акцент робиться на порівнянні двох структур управління зі зворотним зв'язком за станом: простору станів і частотної області. Показано приклад оцінки стійкості за наявності варіації системи з використанням підходу функцій Ляпунова. Показано, що система в номінальних умовах є надійною щодо 50% варіацій апаратних параметрів змінного струму.

Силове електронне живлення потужних електроустановок від трифазної мережі змінного струму зазвичай здійснюється за допомогою трифазних випрямних систем. На відміну від пасивних випрямлячів, Active Front-End (AFE) використовують свої активні компоненти та елементи керування для регулювання вихідної напруги постійного струму до бажаних значень, зберігаючи при цьому високу якість електроенергії, що надходить із мережі [5, 16,17]. На додаток до створення плавного електронного інтерфейсу електромережі, ту саму топологію AFE можна використовувати для надання додаткових мережевих послуг, таких як компенсація реактивної потужності, а нещодавно навіть первинне керування формуванням мережі [18].

Належна робота AFE у згаданих програмах залежить від структури керування, яка використовується з AFE. Крім того, як було показано в [16], не тільки робота, але навіть сам дизайн апаратного забезпечення AFE може залежати від використовуваної структури керування для даного набору вимог до продуктивності. Зокрема, в роботі [16] знайдено обмеження, викликані регулятором, на електричні параметри випрямляча (L, C, f_{sw}). Ці обмеження обмежують простір пошуку конструкції випрямляча, гарантуючи при цьому встановлені вимоги до продуктивності. Загалом, керування випрямлячем AFE впливає на дизайн/оптимізацію обладнання, а також на правильну роботу в різних класичних і нових додатках. Тому проводиться комплексний аналіз управління випрямлячем AFE з різних точок зору. Розглядаються аспекти моделювання, керування та спостереження за станом випрямляча AFE у двох рамках: просторі станів і частотній області.

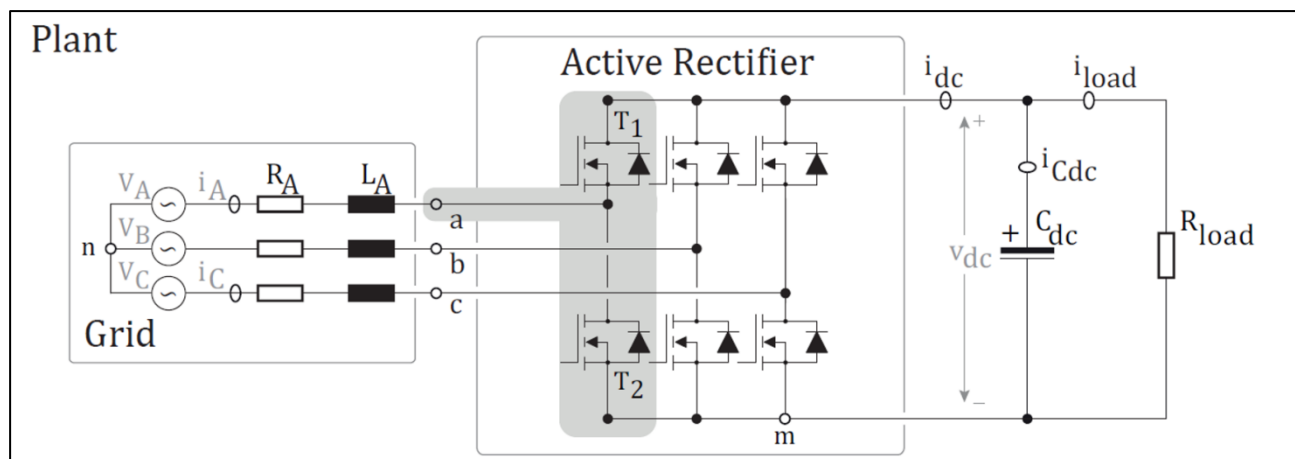


Рис. 4.1 – Принципова схема випрямляча AFE

У наступному розділі виводиться модель малого сигналу випрямляча AFE, що представляє інтерес. Проблеми контролю та спостереження аналізуються у розділах 4.2 та 4.3 відповідно. Оцінка системи при варіаціях параметрів розглядається в розділі 4.4.

4.1. Моделювання випрямляча AFE

Таблиця 4.1, характеристики системи:

Параметр	Символ	Значення	Одиниця
Вхід змінного струму LL RMS Напруга	V_{gLL}	230	Vrms
Вхідна напруга змінного струму Ph Pk	V_g	187,8	V
Напруга шини постійного струму	V_{dc}	400	V
Номінальна потужність	P	25	kW
Номінальний опір навантаженню	R	6,4	Ω
Частота перемикавання	f_{sw}	10	kHz
Частота сітки	f_o	60	Hz
Вхідна індуктивність	L	0,34	mH
Ємність шини постійного струму	C	1300	μF
Опір L	r	5	m Ω
d-струм робочої точки	I_{gd}	88,96	A
Робоча точка q-струм	I_{gq}	0	A
Робоча точка d-Duty	M_d	0,4684	-
Робоча точка q-Duty	M_q	-0,0285	-
Синфазний режим	M_{CM}	0,5	-
Поточна контрольна смуга пропускання	f_i	1	kHz
Пропускна здатність контролю напруги	f_v	100	Hz

Запропонована ідея полягала в моделюванні, аналізі та управлінні підключеним до мережі трифазним випрямлячем AFE, реалізованим як стандартна дворівнева трифазна топологія з шістьма перемикачами. Випрямляч може бути змодельований для живлення резистивного, постійного струму/потужності або повного ZIP-навантаження. Приклад схеми випрямляча з резистивним навантаженням показаний на рис. 4.1. Тут живлення надходить від мережі, яка позначена симетричними трифазними джерелами напруги V_A , V_B , V_C . Трифазний струм мережі проходить через первинні пасивні компоненти фільтра (L і R однакові для трьох фаз), щоб увійти в комутаційний каскад випрямляча. Перемикаючий каскад передає змінні струми на бік постійного струму відповідно до закону керування випрямлячем (ще не визначено). Перетворений постійний струм i_{dc} живить конденсатор C ланцюга постійного струму та резистивне

навантаження R_{load} згідно з рис. 4.1. Початкова нелінійна модель та електричні параметри взяті з [16]. Таблиця I узагальнює відповідні специфікації. Нелінійна модель великого сигналу в [16] базується на усереднених рівняннях напруги/струму, записаних у dq-фреймі, узгодженому з напругою мережі (v_{gd}):

$$\begin{aligned} L \frac{di_{gd}}{dt} &= v_{gd} - m_d v_{dc} - i_{gd} r + \omega 0 L i_{gq} \\ L \frac{di_{gq}}{dt} &= v_{gq} - m_q v_{dc} - i_{gq} r - \omega 0 L i_{gd} \\ C \frac{dv_{dc}}{dt} &= \frac{3}{2} (m_d i_{gd} + m_q i_{gq}) - \frac{v_{DC}}{R} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Після збурення/лінеаризації нелінійних рівнянь установки (4.1) можна прийти до наступної стаціонарної робочої точки співвідношення (4.2) і модель простору стану (4.3):

$$\begin{aligned} (4.2) \quad M_d V_{DC} &= V_{gd} - I_{gd} r \\ M_q V_{DC} &= -\omega 0 L I_{gd} \\ P = \frac{V_{dc}^2}{R} &= \frac{3}{2} (M_d V_{dc} I_{gd}) \end{aligned}$$

$$(4.3) \quad \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\tilde{i}}_{gd} \\ \dot{\tilde{i}}_{gq} \\ \dot{\tilde{v}}_{DC} \end{bmatrix}}_{\dot{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & \omega 0 & \frac{M_d}{L} \\ -\omega 0 & -\frac{r}{L} & -\frac{M_q}{L} \\ \frac{3M_d}{2C} & \frac{3M_q}{2C} & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{i}_{gd} \\ \tilde{i}_{gq} \\ \tilde{v}_{DC} \end{bmatrix}}_x + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{V_{dc}}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{V_{dc}}{L} \\ \frac{3I_{gd}}{2C} & \frac{3I_{gq}}{2C} \end{bmatrix}}_{B_1} \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{m}_d \\ \tilde{m}_q \end{bmatrix}}_{u_1} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{B_2} \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{v}_{gd} \\ \tilde{v}_{gq} \end{bmatrix}}_{u_2}$$

$$\underbrace{\tilde{v}_{dc}}_y = \underbrace{[0 \quad 0 \quad 1]}_C \underbrace{\begin{bmatrix} \tilde{i}_{gd} \\ \tilde{i}_{gq} \\ \tilde{v}_{DC} \end{bmatrix}}_x, D = 0$$

Тут змінними стану були вибрані струми dq-кадру сітки малого сигналу та напруга постійного струму. Вхідна матриця B була розділена на дві частини, щоб розрізнити маніпульовані входи (індекси модуляції слабого сигналу) і збурення (збурення напруги мережі малого сигналу). Вихід - це одна зі змінних стану, якою потрібно керувати, - напруга постійного струму слабого сигналу. Іншою цікавою змінною стану є струм сітки по осі q малого сигналу. $M_d, M_q, I_{gd}, I_{gq} = 0, V_{dc}, V_{gd}$ і $V_{gq} = 0$ є параметри великого сигналу робочої точки, навколо яких проводилася лінеаризація. За номінальних умов і в dq-кадрі, узгодженому з напругою мережі V_{gd} , ці параметри стаціонарного стану оцінюються в таблиці I. Зауважте, що синфазний робочий цикл МСМ відображає напругу стаціонарного стану між точкою зірки сітки та нижньою рейкою випрямляча. Для стандартної модуляції

ШІМ, яка передбачається в цій роботі, згадана напруга підтримується постійною на рівні $V_{CM} = M_{CM}V_{DC} = 0,5$ В постійного струму.

4.2. Керування AFE у двох варіантах

Простір станів та частотна область.

Тут досліджується контроль зворотного зв'язку за станом (SFB), застосований до випрямляча AFE, і розглядається проблема керування з двох точок зору: у просторі стану (SS, ECE717) і в частотній області (FD, ME746). Спочатку повний метод керування зі зворотним зв'язком відноситься до теорії лінійних систем і структури простору станів, які викладаються в класах лінійних систем, таких як ECE717. З іншого боку, існує так званий підхід «зворотного зв'язку повного стану» до керування в структурі частотної області, який викладається в класі керування ME746, що походить від роботи професора Лоренца в UW-Madison. Метою цього розділу є порівняння/протиставлення двох точок зору та висновки про те, чи керування «повним зворотним зв'язком» у частотній області (FD) фактично реалізує той самий закон керування, що й вихідне керування зворотним зв'язком за станом у просторі станів (SS). Випрямляч AFE служить установкою, якою потрібно керувати в обох випадках, а моделювання розглядається в розділі 4.1. Зауважте, що оскільки цей розділ стосується лише проблеми керування, передбачається, що повний стан системи відомий, а збурення напруги в мережі відомі та незначні. Згодом ми послаблюємо деякі з цих припущень у контексті проблеми спостереження. Іншими припущеннями є: досконале знання системних матриць, досконале моделювання системи за допомогою цих матриць і постійна лінеаризована робоча точка.

Розділ 4.2 складається з чотирьох підрозділів:

1. Аналіз керованості: необхідна умова для проектування керування заводом AFE.
2. Дизайн контролера SFB у просторі станів: звичайний підхід до повного контролю зі зворотним зв'язком за станом.
3. Дизайн контролера SFB у частотній області: «фізичний» підхід до повного контролю зі зворотним зв'язком.
4. Порівняння SS і FD SFB: представлення FD

Блок-схема SFB в еквівалентній формі матриці SS SFB, навпаки, і порівняння.

A. Аналіз керованості

З лінійної теорії системи керованість системи можна перевірити за допомогою матриці керованості:

(4.4)

$$C_{CTR} = [B \quad AB \quad \dots \quad A^{n-1}B]$$

і якщо $\text{rank}(C_{CTR}) = n$, система називається керованою.

Це означає, що вектор стану x можна повернути назад до початку координат з будь-якого початкового стану $x_0 \in \mathbb{R}^n$. Підставляючи $n = 3$ і матриці A і B_1 з (3), матриця керованості обчислюється як:

(4.5)

$$C_{CTR} = \begin{bmatrix} -\frac{V_{dc}}{L} & 0 & \frac{3I_{gd}}{2C} \\ 0 & -\frac{V_{dc}}{L} & \frac{3I_{gq}}{2C} \\ C_{CTR,1,3} & C_{CTR,2,3} & C_{CTR,3,3} \\ C_{CTR,1,4} & C_{CTR,2,4} & C_{CTR,3,4} \\ C_{CTR,1,5} & C_{CTR,2,5} & C_{CTR,3,5} \\ C_{CTR,1,6} & C_{CTR,2,6} & C_{CTR,3,6} \end{bmatrix}$$

де записи третього стовпця отримують таким чином:

(4.6)

$$C_{CTR,1,3} = \frac{rV_{dc}}{L^2} - \frac{3I_{gd}M_d}{2CL}$$

$$C_{CTR,2,3} = \frac{\omega V_{dc}}{L} - \frac{3I_{gd}M_q}{2CL}$$

$$C_{CTR,3,3} = \frac{3I_{gd}}{2C^2R} - \frac{3M_dV_{dc}}{2CL}$$

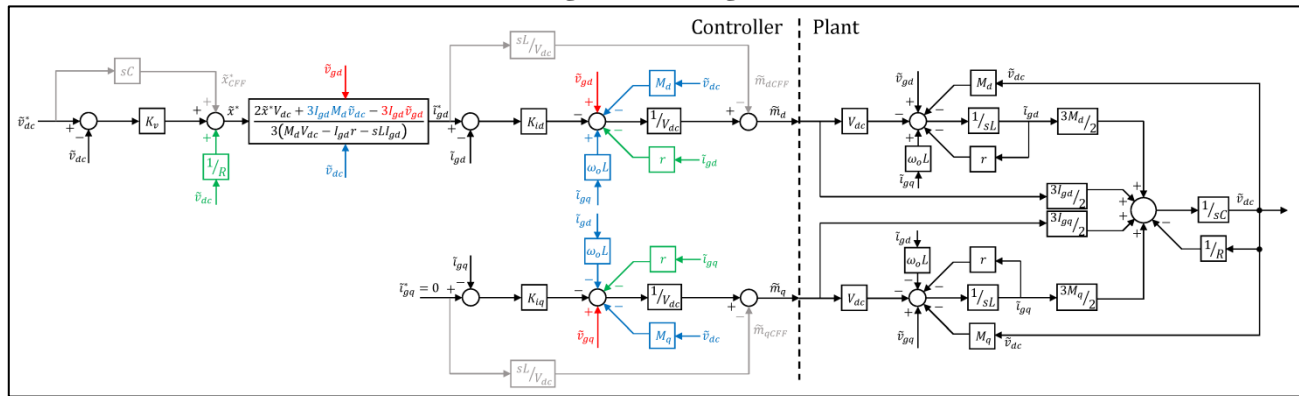


Рис. 4.2 – Розробка контролера зворотного зв'язку за станом частотної області з використанням методів ME746: роз'єднання входних збурень (DID), роз'єднання зворотного зв'язку за станом (SFBD), роз'єднання віртуального нульового опорного зв'язку (VZRD), упередження команд (CFF).

Решта записів не включені через їх розмір. Перевіряючи ранг $CCTR$ з (5) за допомогою MATLAB, він справді дорівнює 3, що означає, що система керована.

Б. Дизайн контролера зі зворотним зв'язком у просторі станів

За умови керованості системи контролер зі зворотним зв'язком за станом може розміщувати власні значення замкнутого циклу в будь-які бажані місця. Як правило, бажані місця розташування власних значень вибираються якомога ближче до дійсної осі та якомога далі до лівої півплощини реально-уявної

площини. Це необхідно для забезпечення швидшої конвергенції, менших перерегулювань, менших коливань під час перехідних процесів і більшого ослаблення/придушення завад. З іншого боку, розташування власних значень обмежене обмеженнями насичення/швидкості наростання системи, специфікаціями послаблення/придушення шуму та неточностями моделі, які, як правило, стають більш вираженими на вищих частотах і встановлюють обмеження на стійкість системи. Згідно з наведеними вище рекомендаціями, зворотний зв'язок за станом дозволяє розміщувати власні значення поблизу або далеко одне від одного. Це значно відрізняється від звичайних методів проектування керування FD, які часто використовують поділ каскадних контурів керування за шкалою часу. Було б цікаво дослідити, як розміщення власних значень зворотного зв'язку за станом впливає на маніпульовані вхідні вимоги, перехідні процеси тощо. Однак ця робота обмежується лише порівнянням двох структур дизайну контролю зі зворотним зв'язком за станом. Таким чином, як для контролерів SS SFB, так і для контролерів FD SFB вибираються звичайні розташування власних значень AFE. Враховуючи частоту перемикавання 10 кГц із таблиці I, у межах традиційного налаштування два замкнуті полюси внутрішнього контуру струму вибираються з частотою 1 кГц ($\lambda_{1,2} = -2\pi fi = -2\pi \cdot 1000$ Гц). Зовнішній полюс петлі напруги вибрано на частоту 100 Гц ($\lambda_3 = -2\pi fv = -2\pi \cdot 100$ Гц) через декаду частотного розділення між петлями. Ці стовпи повинні бути закріплені для обох контролерів цієї роботи. Враховуючи всі припущення вище, динаміка стану з (3) з контролером SS SFB набуває наступного вигляду:

(4.7)

$$\dot{x} = A_x + B_1 \underbrace{(-K_{ss}x)}_{u_1}$$

Тут $K_{ss} \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$ є матрицею контролера SS SFB, яка переміщує власні значення замкнутого циклу динаміки стану в потрібні місця. Використовуючи команду PLACE в MATLAB, можна знайти K_{ss} за умови A, B1 і список бажаних власних значень $\Lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]$:

(4.8)

$$\begin{aligned} K_{ss} &= PLACE(A, B, [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]) = \\ &= \begin{bmatrix} -5.9682 & -0.3204 & -2.3864 \\ 0.3204 & -5.3283 & -0.0713 \end{bmatrix} * 10^{-3} \end{aligned}$$

Зауважте, що для систем з кількома входами алгоритм використовує додаткові ступені свободи, щоб знайти рішення K, яке мінімізує чутливість замкнутих полюсів до збурень в A і B1 [4]. Отриманий контролер SS SFB необхідно порівняти/контрастувати з аналогом FD SFB.

В. Конструкція контролера зворотного зв'язку стану частотної області

Класичний контролер частотної області AFE є каскадною конструкцією з внутрішнім контуром струму та зовнішньою напругою, як у [16]. Для таких каскадних проектів у курсі ME746 були запропоновані додаткові «фізичні» методи FD, які призводять до так званого контролера «зворотного зв'язку за станом»

(SFB), як і звичайний SFB у рамках простору станів. Хоча ці методи номінально не змінюють структуру каскадного керування, вони в кінцевому підсумку усувають додаткові стани керування, пов'язані з інтеграторами, роблячи структуру керування залежною лише від станів зворотного зв'язку. Оригінальний елемент керування SS SFB також не вводить додаткових станів, отже впливає подібність і назва. Загалом існують практичні причини, чому можна захотіти зберегти структуру каскадного керування на відміну від явної конфігурації SS SFB і навпаки. Їх буде розглянуто в наступному підрозділі. У цьому підрозділі, починаючи зі структури керування в [16] і застосовуючи вищезгадані методи з ME746, виводиться конструкція контролера FD SFB для AFE на рис. 4.1 і (4.3).

Класичний каскадний контролер (чорним) з «фізичними» модифікаціями (кольором) для установки AFE зображено на блок-схемі замкнутого циклу на рис. 4.2. Праворуч від пунктирної вертикальної лінії можна знайти детальну структурну схему установки AFE (4.3). Ліворуч від пунктирної вертикальної лінії розташований контролер. Підсилення інтегратора було видалено зі звичайного контролера чорного кольору через зміни кольору. Класична структура використовує d - і q -маніпульовані входи для регулювання d - і q -компонентів струму відповідно. Опорний струм q -компоненти дорівнює нулю, тоді як опорний струм d -компоненти диктується зовнішнім каскадним контролером напруги постійного струму.

Чотири техніки частотної області від ME746 були використані, щоб привести класичний контролер до форми «SFB»: Disturbance Input Decoupling (DID), State Feedback Decoupling (SFBD), Virtual Zero Reference Decoupling (VZRD) і Command Feedforward (CFF). DID (червоний на рис.4.2) намагається усунути зовнішні перешкоди шляхом вимірювання та застосування однакових і протилежних сигналів через керовані входи. У випадку AFE перешкоди слабого сигналу напруги мережі можуть бути відокремлені, як показано. SFBD (синій на рис. 4.2) намагається скасувати вплив усіх інших станів на дану динаміку стану шляхом вимірювання та застосування однакових і протилежних сигналів через керовані входи. Наприклад, зі сторони установки видно, що на динаміку $\widetilde{i}_{gd}$ впливають $\widetilde{v}_{dc}$ через M_d , і відповідний SFBD роз'єднує цей ефект. VZRD (зелений на рис. 4.2) можна розглядати як підмножину SFBD, яка враховує вплив самого стану на власну динаміку. Разом DID, SFBD і VZRD розбивають динаміку установки таким чином, що вона стає системою першого порядку, якою можна легко керувати з нульовою похибкою в стаціонарному стані, використовуючи лише пропорційне підсилення. Наприклад, зосереджуючись лише на динаміці $\widetilde{i}_{gd}$, DID, SFBD і VZRD скасовують усі впливи установки на $\widetilde{i}_{gd}$, залишаючи простий $1/sL$ як установку, якою потрібно керувати. Вибравши коефіцієнт підсилення

$K_{id} = \omega_i L$, можна просто помістити полюс замкнутого циклу внутрішнього циклу i_{gd} у потрібне місце ω_i . Нарешті, CFF (сірий на рис.4.2) враховує потенційно непостійні команди у відповідних циклах і передає їх на керовані

входи, щоб забезпечити найкраще відстеження команд (без фазової затримки та ослаблення сигналу). Після внесення всіх модифікацій управління можна налаштувати відповідні каскадні петлі на бажану смугу пропускання, яка відповідає контролеру SS SFB і таблиці 1. Для коефіцієнта підсилення петлі струму по осі q:

(4.9)

$$T_q(s) = \frac{K_{iq}}{sL} \rightarrow K_{iq} = 2\pi f_i L = \omega_i L$$

Для каскадної функції передачі струму і напруги по замкнутому контуру по осі d:

(4.10)

$$G_d(s) = \frac{1}{\frac{s^2 CL}{K_{id}K_v} + \frac{sC}{K_v} + 1} = \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_i\omega_v} + \frac{s(\omega_v + \omega_i)}{\omega_i\omega_v} + 1} \rightarrow$$

$$K_{id} = (\omega_i + \omega_v)L, \quad K_v = \frac{\omega_i\omega_v C}{(\omega_i + \omega_v)}$$

Нарешті, встановивши значення $\widetilde{v}_{dc}^* = 0$ і помноживши всі коефіцієнти посилення для умов постійного струму (оскільки обидва значення дорівнюють нулю), можна отримати наступні рівняння для керованих входів:

(4.11)

$$\begin{aligned} \widetilde{m}_d &= -k_{11}\widetilde{i}_{gd} - k_{12}\widetilde{i}_{gq} - k_{13}\widetilde{v}_{dc} \\ \widetilde{m}_q &= -k_{21}\widetilde{i}_{gd} - k_{22}\widetilde{i}_{gq} - k_{23}\widetilde{v}_{dc} \end{aligned}$$

Де підсилення k_{ij} наступні:

(4.12)

$$\begin{aligned} k_{11} &= \frac{r - K_{id}}{V_{dc}} = -5.8623 * 10^{-3} \\ k_{12} &= \frac{\omega_0 L}{V_{dc}} = -0.3204 * 10^{-3} \\ k_{13} &= \frac{M_d}{V_{dc}} - \frac{2K_{id}V_{dc}[K_v - R^{-1}] - 3K_{id}I_{gd}M_d}{3V_{dc}[M_dV_{dc} - I_{gd}r]} = -2.4338 * 10^{-3} \\ k_{21} &= \frac{\omega_0 L}{V_{dc}} = -0.3204 * 10^{-3} \\ k_{22} &= \frac{K_{iq} - r}{V_{dc}} = -5.3282 * 10^{-3} \\ k_{23} &= \frac{M_q}{V_{dc}} = -0.0713 * 10^{-3} \end{aligned}$$

Або, зібравши разом у матрицю K_{FD} :

(4.13)

$$K_{FD} = \begin{bmatrix} -5.8623 & -0.3204 & -2.4338 \\ 0.3204 & -5.3282 & -0.0713 \end{bmatrix} * 10^{-3}$$

Отриманий контролер FD SFB у матричній формі необхідно порівняти з аналогом SS SFB.

Г. Порівняння SFB у просторі станів і частотній області

Порівнюючи контролери в (4.8) і (4.13), можна побачити, що вони відрізняються один від одного в межах 2% у найгіршому випадку для поточної робочої точки. Інші робочі точки також були оцінені, і спостережуване вирівнювання також справедливо для цих точок. Таким чином, принаймні для випадку AFE, можна зробити висновок, що «фізичне» повне керування зі зворотним зв'язком за станом у частотній області дійсно реалізує початкове керування зі зворотним зв'язком за станом у просторі станів і що використання терміну «зворотний зв'язок за станом» у цьому випадку є правильним. Крім того, можна стверджувати, що розроблений контролер FD SFB має найвищу стійкість до варіацій параметрів у A та B_1 , оскільки він практично такий самий, як контролер SS SFB, для якого твердження щодо надійності є вірним завдяки команді PLACE та [17]. Додаткову інформацію про оцінку надійності можна знайти в Розділі V. Порівнюючи проектні зусилля контролерів, підхід до простору станів є більш привабливим. Дійсно, підхід до простору станів сприяє швидкому та точному розміщенню полюсів замкнутого циклу, підтвердженням гарантіям надійності [17] та легкому реалізуванню прямого зв'язку команд без необхідності розглядати взаємодію каскадного циклу. Порівнюючи зусилля з проектування контролерів, підхід з використанням простору станів є більш привабливим. Дійсно, навіть без додаткових станів контролера, він використовує каскадування, яке інтуїтивно корисно відокремлює динаміку швидкого стану низької енергії від динаміки повільного стану високої енергії. Хоча у випадку AFE цей поділ не такий очевидний, принаймні з оцінки робочої точки ємнісне накопичення енергії $\frac{CV_{dc}^2}{2} = 104$ Дж набагато більше, ніж індуктивне накопичення енергії $\frac{LI_{gd}^2}{2} = 1,34$ Дж. З точки зору безпеки, корисно мати явний контур струму, до якого можна застосувати обмежувач опорного струму. З точки зору дискретного керування, швидший стан (струм) може бути відібраний на набагато вищій частоті, ніж повільний стан (напруга), що означає менші вимоги до розподілу обчислювального обладнання для обчислень зовнішніх контурів. Крім того, менша частота дискретизації для зовнішніх станів збільшує роздільну здатність на вибірку. З точки функціональності, той факт, що контролер FD SFB забезпечує явні аналітичні зв'язки (4.12) між підсиленнями контролера та робочими точками, є дуже корисним, оскільки можна реалізувати планування підсилення зі змінними підсиленнями для безпечної роботи в різних робочих точках у межах конкретного завдання. З іншого боку, зв'язок K_{ss} контролера SS SFB з параметрами в A і B_1 не такий очевидний. Нарешті, шкала часу, що розділяє внутрішній і зовнішній цикли, робить систему більш надійною. Якісно, коли власні значення знаходяться далеко

одне від одного, потрібна значна варіація параметрів, щоб суттєво змінити динаміку замкнутого циклу, тоді як близькі власні значення можуть переміщатися/відриватися від дійсної осі з деякою варіацією параметрів, суттєво змінюючи характер динаміки.

4.3. Спостереження за станом AFE

Постановка системи (3) така, що для зворотного зв'язку використовуються тільки датчики напруги. Це означає, що вимірюється напруга постійного струму $\widetilde{v}_{dc}$, але також вимірюються напруги сітки кадру $\widetilde{v}_{gd}$ і $\widetilde{v}_{gq}$. У (3) напруги мережі містяться на вході u_2 ; вони не є змінною стану. Для реалізації керування AFE необхідний вектор стану, включаючи струми $\widetilde{i}_{gd}$ і $\widetilde{i}_{gq}$. Оскільки струми не вимірюються безпосередньо, їх необхідно оцінити. У цьому розділі досліджується спостережуваність AFE. Потім пропонується структура спостерігача для оцінки невимірюваних струмів.

А. Аналіз спостережуваності

З теорії лінійних систем керованість пов'язана зі спостережуваністю через формулювання подвійної системи. Зрештою, матриця спостережуваності визначається як

(4.14)

$$\mathcal{O}_{OBS} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

і якщо $\mathcal{O}_{OBS} = n$, система називається спостережуваною. Це означає, що вектор стану x може бути виведений із знання вихідних даних y та входів u , а також системних матриць. Підставляючи $n = 3$ і матриці A і C з (3), матриця спостережуваності обчислюється як:

(4.15)

$$\mathcal{O}_{OBS} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \frac{3M_d}{2C} & \frac{3M_q}{2C} & -\frac{1}{RC} \\ \mathcal{O}_{OBS,3,1} & \mathcal{O}_{OBS,3,2} & \mathcal{O}_{OBS,3,3} \end{bmatrix}$$

Де:

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{OBS,3,1} &= \frac{-3R(LM_{q\omega_0} + M_d r)C - 3M_d L}{2C^2 LR} \\ \mathcal{O}_{OBS,3,2} &= \frac{3R(LM_{d\omega_0} + M_q r)C - 3M_q L}{2C^2 LR} \\ \mathcal{O}_{OBS,3,3} &= \frac{-3R^2(LM_d^2 + M_q^2)C + 2L}{2C^2 LR^2} \end{aligned}$$

Ранг $\mathcal{O}_{OBS}$ з (4.15) справді дорівнює 3, що означає, що система є спостережуваною.

Б. Дизайн спостерігача

Оскільки система є спостережуваною відповідно до розділу 4.2-А, можна створити спостерігач, який може точно оцінити невимірні стани: $\widetilde{i}_{gd}$ і $\widetilde{i}_{gq}$. Спостерігач формується за допомогою матриць системи з (4.3): A , B_1 , B_2 і C . Передбачається, що всі матриці відомі досконало і що реальна система ідеально відповідає лінійній моделі. Крім того, робоча точка, в якій система лінеаризується, повинна бути постійною. Блок-схема запропонованого спостерігача показана на рис. 3 з використанням позначення з (4.3). Вхід спостерігача розділений на дві частини: (i) контрольний вхід: u_1 , і (ii) вимірні напруги: u_2 і y . Підсилення матриці зворотного зв'язку L використовується для налаштування продуктивності спостерігача, а отже, властивостей конвергенції оцінки.

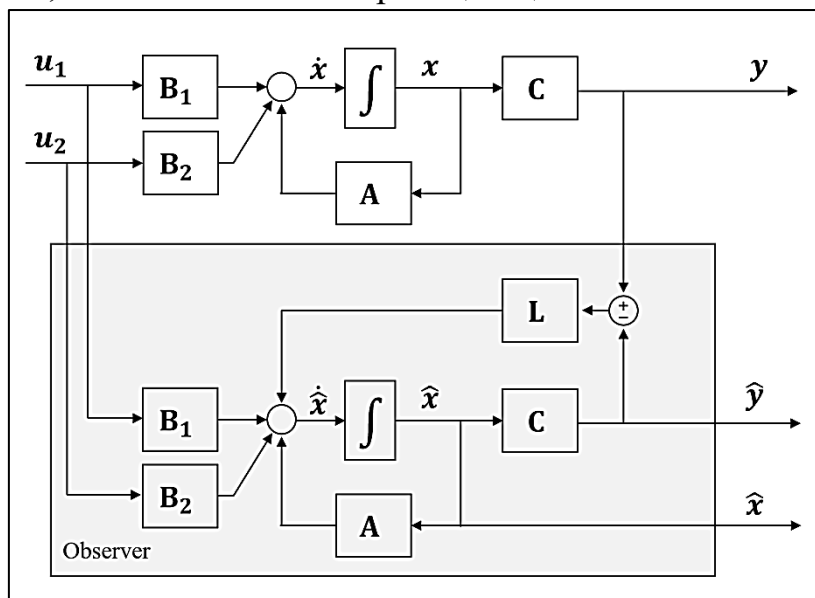


Рис. 4.3 – Запропонована структура спостерігача для оцінки невимірних струмів, $\widetilde{i}_{gd}$ і $\widetilde{i}_{gq}$, які містяться в $\hat{x}$.

В. Налаштування спостерігача

Коефіцієнт L зворотного зв'язку від спостерігача має вирішальне значення для ефективності оцінювання. Динаміка спостерігача визначається:

(4.16)

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + B_1u_1 + B_2u_2 + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= C\hat{x}\end{aligned}$$

Визначаючи похибку оцінки стану як $e = x - \hat{x}$, динаміку спостерігача можна записати через e як:

(4.17)

$$\dot{e} = (A - LC)e$$

Динаміку похибки оцінювання (17) можна довільно встановити шляхом розміщення власних значень $A - LC$ через вибір L . Нагадаємо, що це можливо, оскільки система є спостережуваною. Як правило, динаміка оцінки стану вибирається принаймні на порядок швидшою за динаміку керування.

4.4. Оцінка надійності за функціями Ляпунова

Протягом усієї роботи було кілька згадок про стійкість системи щодо варіацій параметрів. Команда MATLAB PLACE використовує чутливість власних значень до варіацій параметрів A і B_1 як представлення стійкості. Якісне обговорення контролера FD SFB згадує замкнуте поділ полюсів як ознаку надійної системи. Щоб більш точно оцінити стійкість системи, можна використати підхід стійкості Ляпунова до систем, що змінюються в часі. Для замкнутих змінних у часі систем з певними обмеженнями на зміну параметрів $A_{cl}(t)$ можна зробити висновок про асимптотичну стійкість системи незалежно від тимчасової природи змін параметрів у визначених межах, якщо існує позитивно визначена функція Ляпунова $V(x)$ з негативно визначеною похідною за часом для всіх можливих $A_{cl}(t)$. Розглянемо 50% варіації параметрів L і r , наприклад, через ефект тепла/насичення/близькості. Оскільки L, r входять до системних матриць A і B_1 , записи в них зміняться, впливаючи на $A_{cl}(t) = A(t) - B_1(t)K$. Оскільки ці варіації не моделюються, матриця контролера не зміниться (як SS, так і FD SFB). Можна зробити висновок про надійну асимптотичну стійкість системи в таких умовах, якщо існує $P = P^T > 0$, таке, що:

(4.18)

$$V(x) = x^T P x > 0$$

$$\dot{V}(x) = x^T (A_{CL}^T(t)P + PA_{cl}(t))x < 0, \forall x \neq 0, \forall t$$

Щоб розв'язати P , можна визначити $Q = I$, прирівняти $\dot{V}(x) = -Q$ і використати команду MATLAB LYAP, щоб знайти P . Отримана матрична форма послужила натхненням для створення такої енергетичної матриці P :

(4.19)

$$P = \begin{bmatrix} \frac{L}{2} & 0 & \frac{\sqrt{LC}}{4} \\ 0 & \frac{L}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{LC}}{4} & 0 & \frac{C}{2} \end{bmatrix} = P^T > 0$$

Діапазон параметрів, що представляють інтерес ($0,5L \rightarrow 1,5L, 0,5r \rightarrow 1,5r$) було переміщено з високою роздільною здатністю для оцінки $A_{cl}(t)$ у кожному випадку, припускаючи, що K є постійним. Для кожного випадку від'ємну скінченність $A_{cl}^T(t)P + PA_{cl}(t)$ оцінювали шляхом перевірки відповідних власних значень. Тут, якщо всі власні значення по всій розгортці строго від'ємні, можна зробити висновок про стійку асимптотичну стабільність системи за

наявності варіації параметрів. Відповідні власні значення зображені на рис. 4.4. Таким чином, було показано, що навіть зі змінами параметрів на стороні змінного струму в діапазоні $\pm 50\%$ замкнута система все ще є надійно асимптотично стабільною. Зауважте, що такі висновки не можна зробити просто з оцінки власних значень замкнутої системи в діапазоні параметрів. Функції Ляпунова пропонують потужні інструменти для аналізу та проектування управління. Подальше освоєння цих інструментів, безперечно, є цікавою перспективою на майбутнє.

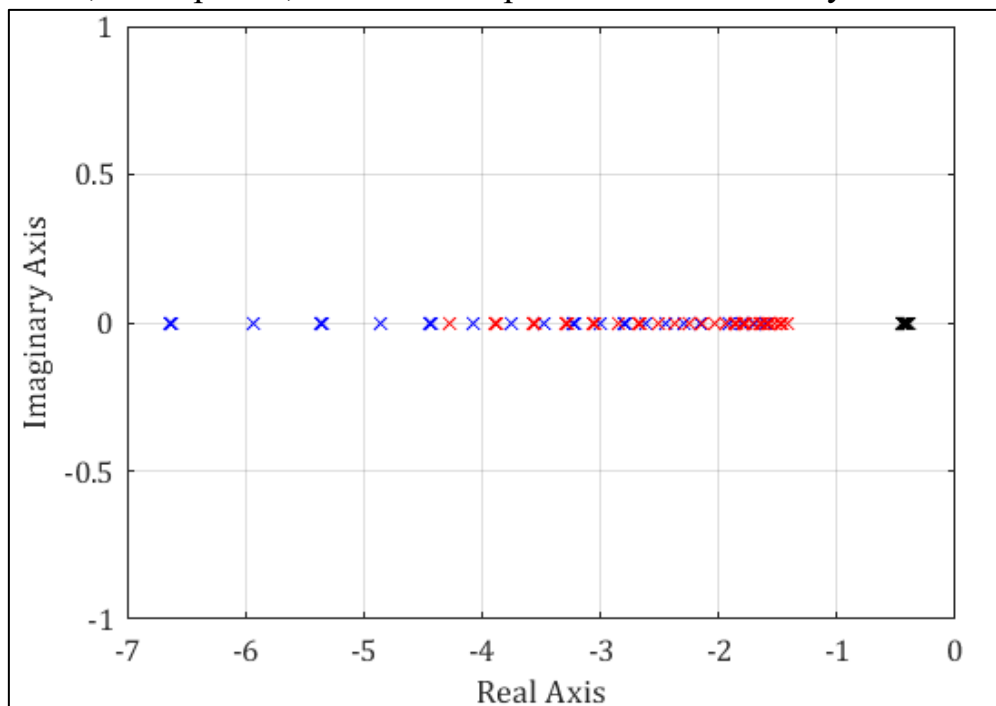


Рис. 4.4 – Розгортка власних значень матриці $A_{cl}^T(t)P + PA_{cl}(t)$

ВИСНОВКИ

Дослідження електромагнітних та електромеханічних властивостей в усталеному режимі системи PMSG-AR дозволило оцінити працездатність системи валогенератора при зміні частоти обертання валу та навантаження. Запропоноване керування AR дозволило оптимізувати систему валогенератора за рахунок зниження реактивної потужності в системі PMSG-AR. Реактивні струми i , відповідно, втрати в перетворювачі і машині можуть бути в кілька разів меншими при певному співвідношенні амплітуди і фази напруги (струму) на стороні змінного струму AR. Оптимізація енергетичних властивостей генераторних установок набуває особливого значення при побудові потужних гібридних транспортних систем і систем з повною електричною тягою. Ці системи мають різні за потужністю джерела електричної енергії, що працюють на сумарному змінному навантаженні. Прикладами таких об'єктів є наземний, морський, річковий і повітряний транспорт, а прикладами таких джерел електричної енергії - дизель-генератори, валогенератори, паро- і турбогенератори, акумулятори, суперконденсатори та ін.

Розглянуто моделювання та всебічний аналіз системи випрямляча з Active Front End (AFE) з двох точок зору: простору станів і частотної області. По-перше, був тісний взаємозв'язок апаратного керування, що спонукало до глибшого розуміння керування випрямлячем AFE для конструкції апаратного забезпечення та загальної роботи системи. Далі була виведена лінеаризована модель малого сигналу. Використовуючи похідну модель, порівнювали дві системи керування зі зворотним зв'язком за станом – простір станів і частотну область. Виявилось, що, принаймні для випадку AFE, «фізичний» контролер частотної області SFB насправді є оригінальним контролером простору станів SFB, тому термін «зворотний зв'язок за станом» для контролера FD SFB було застосовано правильно. У процесі можна визначити аналітичні зв'язки між посиленнями контролера SFB і параметрами системи, включаючи робочі точки. Далі розглядався дизайн спостерігача стану AFE, враховуючи наявність лише вимірювань напруги. Це може бути дуже корисно з практичної точки зору, оскільки датчики струму потребують не лише самих датчиків, але й усіх супутніх периферійних пристроїв, таких як доріжки, аналого-цифрове перетворення, простір тощо. Показано, як функції Ляпунова можна використовувати для оцінки стійкості системи, що змінюється в часі, за умов варіації певних параметрів. Т.ч., існує функція Ляпунова, яка може довести надійну асимптотичну стійкість системи за наявності 50% варіації апаратних параметрів змінного струму.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. B. Bilgin et al., "Making the case for electrified transportation," *IEEE Trans. Transport. Electrific.*, vol. 1, no. 1, pp. 4–17, Jun. 2015.
2. J. Prousalidis, C. Patsios, F. Kanellos, A. Sarigiannidis, N. Tsekouras, and G. Antonopoulos, "Exploiting shaft generators to improve ship efficiency," in *Proc. Int. Conf. Elect. Syst. Aircraft, Railway, Ship Propuls. Road Vehicles (ESARS)*, Oct. 2012, pp. 1–6.
3. Trong T., Duc M., Ngo Q-V. The Power-Sharing System of DFIG-Based Shaft Generator Connected to a Grid of the Ship. *IEEE Access*, 2021, pp. 1 - 11. 10.1109/ACCESS.2021.3102659.
https://scholar.google.com/scholar?as_q=The+Power-Sharing+System+of+DFIG-Based+Shaft+Generator+Connected+to+a+Grid+of+the+Ship&as_occt=title&hl=en&as_sdt=0%2C31
4. ACS880 multidrive cabinets and modules 3AUA0000102324
5. A. Sarigiannidis, A. Kladas, E. Chatzinikolaou, and C. Patsios, "High efficiency shaft generator drive system design for Ro-Ro trailer-passenger ship application," in *Proc. Int. Conf. Elect. Syst. Air-craft, Railway, Ship Propuls. Road Vehicles (ESARS)*, Mar. 2015, pp. 1–6.
6. MATLAB SCHOOL. Virtual laboratory for power electronics and electromechanical devices in Matlab+Simulink software. Lesson 26: Optimization of energetic properties of mechatronic system by means of electric machine with power electronic, Magazine „Power electronics” Vol. 3, No 72, pp. 68-75, 2018, (ISSN 2079-9322).
7. German-Galkin S., Tarnapowicz D. Energy Optimization of Ship's Shaft Generator with Permanent Magnet Synchronous Generator. *Nase More*, 2020, vol. 6, no. 2, pp. 138 - 145.
8. Gan S.-H., Bi S.-M., Gu W., Jian-xin C. Improved Z-source grid-connected inverter of ship shaft generator. *Dianji Yu Kongzhi Xuebao*, 2018, vol. 22, no. 12, pp. 68–76.
9. Liang D., Wang D., Peng Z. Synchronization of shipshaft DFIG based on linear active disturbance rejection control. *Small & Special Electrical Machines*, vol. 45, no. 2, pp. 83–87, 2017
10. Oo T., Ren Y., Kong A., Wang Y., Liu X. Power System Design Optimization for a Ferry Using Hybrid-Shaft Generators. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, pp. 1 - 1. 10.1109/TPWRS.2021.3128239.
11. Langtao Y., Jiawan T., Yusheng L., Hui Y. Modeling of Marine Asynchronous Shaft Generator and Simulation of Subsynchronization State. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, pp. 1 - 11. 10.1155/2020/3054969.
12. Sarigiannidis A.G., Chatzinikolaou E., Patsios C., Kladas A. G. Shaft generator system design and ship operation improvement in-volving SFOC minimization, electric grid conditioning, and auxiliary propulsion. *IEEE Trans. Transport. Electrific.*, 2016, vol. 2, no. 4, pp. 558–569.

13. Vyngra A., Avdeev B. Improving the Power Quality of a Marine Automated Digital Substation by Using an Active Filter. 2021 4th International Youth Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA), 2021.
14. Prousalidis, J.M., Xanthopoulos E., Voutzoulidis K. Reactive power sharing in ship energy systems with shaft generators. *Proceedings of IMarEST. Part A. Journal of Marine Engineering and Technology*, 2009, pp. 21 - 38.
15. Kun X. Zhongwei Z., Nan W., Ping Z. Operation and simulation research of the variable-speed constant-frequency system of the ship shaft generator. *Presented at 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Singapore, 22-25 Nov. 2016 ; pp. 301 - 304.
16. ABB Low Voltage Wind Turbine Converters, ACS800, 0.6 to 6MW, ABB, Zürich, Switzerland, 2013.
17. Q.-C. Zhong and Z. Lyu, “Droop-controlled rectifiers that continuously take part in grid regulation,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 8, pp. 6516–6526, 2019.
18. J. W. Kolar and T. Friedli, “The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems—Part I,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 1, pp. 176-198, Jan. 2013.
19. T. Friedli, M. Hartmann and J. W. Kolar, “The Essence of Three-Phase PFC Rectifier Systems—Part II,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 2, pp. 543-560, Feb. 2014.
20. <https://shipnerdnews.com/the-2-main-shaft-generator-technologies-available-now/>
21. Chandra Bajracharya; “Control of VSC-HVDC for wind power”; NTNU; 2008.