

## ОСОБЛИВОСТІ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ БЕЗМУЛЬТИПЛІКАТОРНИХ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК

У статті досліджено процеси функціонування схеми перетворення електричної енергії перетворювачем частоти безмультиплікаторної вітроелектричної установки в аварійних режимах роботи. Розглянуті основні види аварійних ситуацій даного перетворювача. Наведено підхід до розрахунку струму короткого замикання синхронного генератора та струму короткого замикання LC-контуру. Для захисту схеми та надійності функціонування в аварійних режимах запропоновано елементи захисту (запобіжники, швидкодіючі датчики струму).

**Ключові слова:** перетворювач частоти, аварійний режим, синхронний генератор, випрямляч, вітроелектрична установка.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Безмультиплікаторні схеми турбогенераторної вітроелектричної установки (ВЕУ) виробництва фірми «Конкорд» на відміну від класичних схем ВЕУ мають ефект автостабілізації електромеханічної системи в оптимальному режимі в широкому діапазоні зміни вітрового потоку [1]. З метою підвищення її ефективності та реалізації автономного режиму необхідно використовувати перетворювачі частоти для узгодження частоти напруги генератора та мережі [2]. Схеми таких перетворювачів мають складну структуру, вони містять декілька джерел живлення та декілька випрямлячів, ємнісні накопичувачі, імпульсні перетворювачі та багаторівневі інвертори. В процесі експлуатації ВЕУ часто мають місце аварійні режими роботи даної схеми. В зв'язку з цим вивчення та дослідження аварійних режимів роботи схеми, а також методів усунення аварій за допомогою удосконалення силової схеми є актуальною науково-практичною задачею.

**Предметом дослідження** даної роботи є аналіз аварійних ситуацій на базі схеми перетворювача типу МПЧ-Т2ПТТ-418-690-50У3 для ВЕУ ТГ-1000, які виникають через ушкодження силових напівпровідникових приладів в одному або декількох колах перетворювача, а також через порушення нормального функціонування системи керування, та науково-практичні підходи до вирішення задачі по запобіганню або ліквідації наслідків аварії.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ПУБЛІКАЦІЙ

Процеси функціонування безмультиплікаторних ВЕУ в стаціонарних режимах досить повно висвітлені Андрієнко П. Д. та Голубенко М. С. [1, 2]. Кошелєв К. С. [3] описав аварійні режими та засоби захисту статичного реактивного компенсатора потужності, до складу якого входить трирівневий мостовий інвертор. Алгоритми керування трирівневими інверторами висвітлені Колпаковим А. І. [5]. Шрайбер Д. А. [7] описав різні види багаторівневих інверторів та генераторів, які використовують-

ся для потужних ВЕУ за кордоном. Але дослідження функціональності схеми перетворювача безмультиплікаторної ВЕУ в аварійних режимах досі не проводилися, що зумовлює актуальність даної роботи.

**Метою** статті є підвищення надійності процесів функціонування схеми перетворення електричної енергії перетворювачами частоти безмультиплікаторної ВЕУ в аварійних режимах роботи, що забезпечить зменшення кількості аварій та надійний захист цінного обладнання.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На рис. 1 показана спрощена схема, що досліджується. Вона складається з трьох генераторів, трьох мостових трифазних випрямлячів, трьох імпульсних перетворювачів постійної напруги (ППН) та двох трирівневих мостових інверторів.

У перетворювачі відбувається багаторівневе перетворення електричної енергії. Напруга генераторів змінюється в деякому діапазоні, як за амплітудою, так і за частотою, в залежності від швидкості вітру, випрямляється в некерованому випрямлячі та стабілізується ППН. Формування синусоїдальної змінної напруги з регульованою частотою здійснюється трирівневим мостовим інвертором. Схема забезпечує підтримку частоти обертання генераторів. Частота комутації ключа ППН – 1000 Гц, частота комутації ключа трирівневого інвертора – 900 Гц. Ланка постійного струму має велику ємність, яка призначена для згладжування пульсацій випрямленої напруги та накопичення енергії як джерела напруги для живлення інвертора [2].

З метою уточнення класифікації аварійних режимів роботи даної схеми розглянемо можливі аварійні ситуації. Аварії в залежності від місця їх виникнення розділяють на зовнішні та внутрішні, а також перенапруги [3]. Принагідно слід зазначити, що внутрішнє та зовнішнє коротке замикання викликають значний гальмівний момент на валу вітрогенератора, в зв'язку з чим необхідна перевірка його механічної частини.

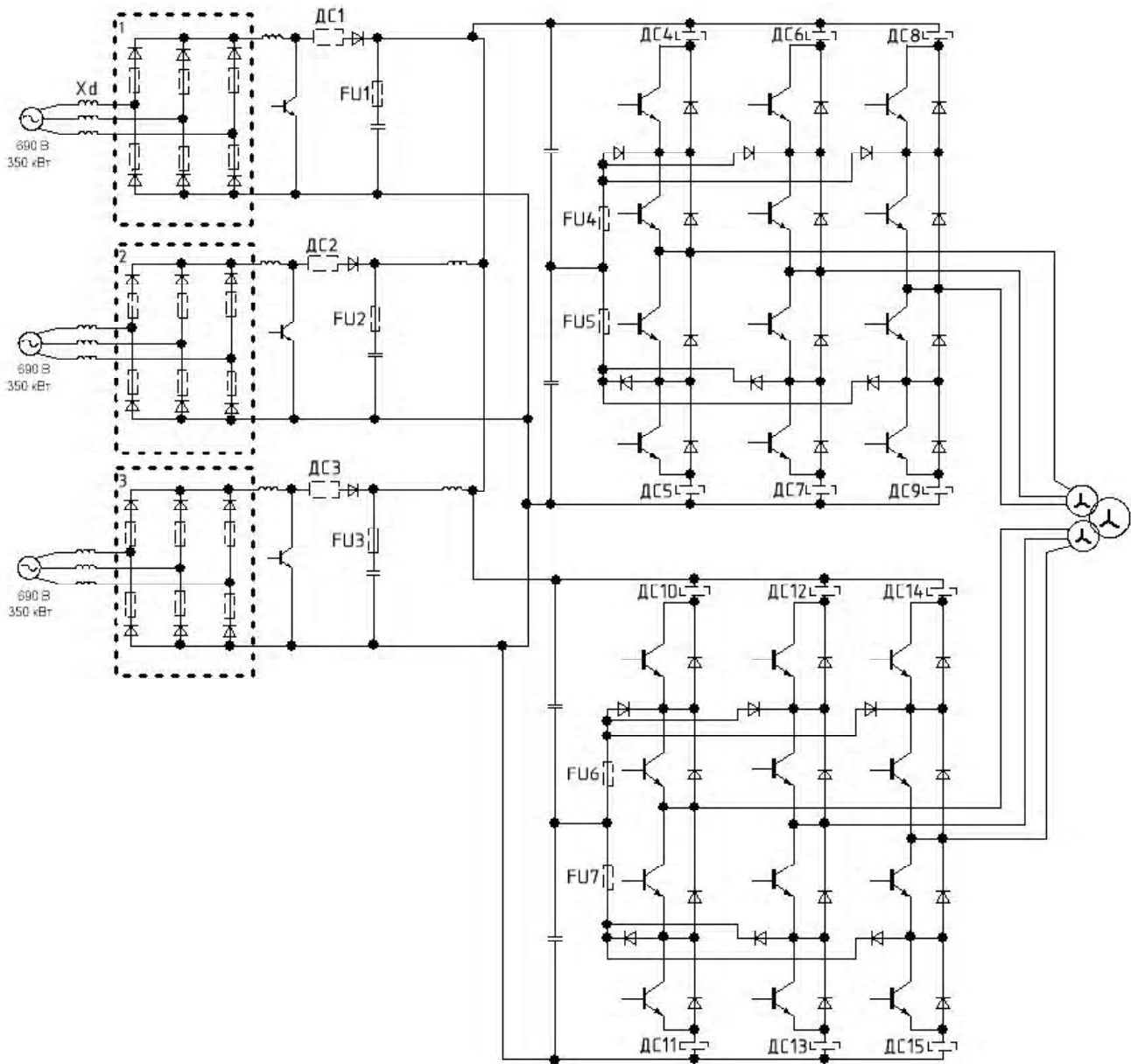


Рис. 1. Спрощена електрична схема перетворювача типу МПЧ-Т2ТПТ-418-690-50V3 для ВЕУ ТГ-1000 [2]

Розглянемо можливі аварійні ситуації даного перетворювача.

По-перше: внутрішнє коротке замикання в одному з випрямлячів перетворювача, яке пов'язане з пробоем одного з діодів та замиканням напівпровідникової структури. У результаті виникає двофазне коротке замикання між фазами, яке спричинить коротке замикання у статорних обмотках синхронного генератора та викривлення випрямленої напруги.

Амплітуда струму короткого замикання випрямляча при роботі з явнополюсним синхронним генератором визначається за формулою [4]:

$$I_{кз} = \frac{E_m}{X_d} = \frac{\sqrt{2} \cdot E_0}{X_d} \cdot K_y, \quad (1)$$

де  $E_m$  – амплітуда внутрішньої ЕРС генератора;  $X_d$  – індуктивний опір по продольній осі генератора;  $E_0$  – ЕРС холостого ходу генератора;  $K_y$  – ударний коефіцієнт, визначається співвідношенням  $\frac{X_d}{R_a}$ ;  $R_a$  – активний опір кола, при достатньо малому  $R_a - K_y \approx 2$ .

Ліквідацію аварії пропонується виконувати запобіжниками фірми Ferraz Shawmut (блоки 1, 2, 3 (пунктир) на рис. 1). Необхідність встановлення запобіжників залежить від потужності генератора. Для даного генератора типу СГ-300 запобіжники не потрібні, тому що струм короткого замикання генератора  $I_{кз}$  (1) становить приблизно 2 кА, а це значно менше ударного струму діодів. Для більш потужних ВЕУ замість діодів із запобіжниками можливе використання тиристорів, які вмикаються в нор-

мальному режимі з  $\alpha = 0$  (кут керування тиристором), що дозволяє зменшити струм короткого замикання блокуванням керуючих імпульсів тиристорів. Вибір схеми захисту здійснюється на підставі техніко-економічного обґрунтування або на вимогу замовника.

Вихід з ладу діода призведе до несиметричного навантаження фаз генератора і значних пульсацій вихідної напруги, що є неприпустимим для ВЕУ через те, що викликає асиметрію в навантаженні вітроколеса та перевантаження ІППН. Усунення такого режиму можливе зменшенням струму збудження генераторів або вимкненням інверторів, що вимагає створення спеціальних систем захисту ВЕУ від аварійних режимів.

По-друге: аварійний режим ІППН, спричинений пробом діода ІППН через перегрів його структури в процесі перевантажень, призводить до виникнення аварійного струму в колі транзистора та конденсатора. Розвитком такої аварії буде виникнення пробою транзистора, що є найбільш важким аварійним режимом роботи перетворювача, він супроводжується протіканням великих струмів з високими значеннями швидкості наростання струму ( $\frac{di}{dt}$ ) [3]:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_k}{L_k}, \quad (2)$$

де  $U_k$  – напруга колектора;  $L_k$  – індуктивність колектора. Для перетворювача типу МПЧ-Т2ТТТ-418-690-50У3

похідна струму  $\frac{di}{dt} = 200 \cdot 10^6 \text{ А/мкс}$ . Для запобігання такій аварії пропонується перед діодом встановити швидкодіючий датчик струму (ДС1-ДС3). Сигнал датчика закриває транзистор до настання значення амплітуди допустимого струму. При наведених значеннях  $\frac{di}{dt}$  датчик має спрацювати за 1–2 мкс.

По-третє: можливий також пробій діода надто високою напругою при виході з ладу ланки захисту від перенапруг. Перенапруги виникають при вимкненні транзисторів у ланці постійного струму на елементах фільтру, значення перенапруги на ємності буде складати [6]

$$\Delta U_C = I_d \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot e^{-\frac{1}{2Q}} \frac{\pi}{2} \approx 0,92 \cdot I_d \rho, \quad (3)$$

де  $Q$  – добротність контуру, що містить індуктивність ( $L$ ) та ємність ( $C$ );  $I_d$  – миттєве значення струму в реакторі в момент вимкнення транзистора.

Струм короткого замикання  $LC$ -контуру розраховується за формулою [6]

$$I_{кз} = \frac{U}{\rho}, \quad (4)$$

де  $U$  – напруга контуру постійного струму;  $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$  – хвильовий опір контуру.

Для захисту конденсаторів пропонується встановити швидкодіючі запобіжники (FU1-FU3). Вихід з ладу діода унеможливує функцію ІППН як стабілізатора напруги, це призведе до коливання напруги інвертора, а це в свою чергу призведе до необхідності вводити захисну функцію в систему автоматичного керування інвертора, щоб забезпечити нормальне функціонування ВЕУ.

По-четверте: внутрішнє коротке замикання інвертора, наприклад вихід з ладу одного з транзисторів трирівневого інвертора, унеможливує його нормальне функціонування. В разі виходу з ладу напівпровідникових приладів або керуючої системи інвертора він повинен відімкнутися від схеми і перетворення енергії буде відбуватися іншим інвертором. Як запобіжний захід пропонується встановити перед транзисторами швидкодіючі датчики струму (ДС4-ДС15). Датчик повинен виявити неприпустиме перевищення струму в ланцюзі інвертора та подати сигнали на замикання/розмикання транзисторів за 1–2 мкс. Також пропонується встановити запобіжники (FU4-FU7), які захищають інвертор від аварійного струму.

На рис. 1 пунктиром показано запропоноване автором розміщення захисних елементів (запобіжників (FU1-FU7), швидкодіючих датчиків струму (ДС1-ДС15)).

Рекомендовані захисні елементи (датчики струму ДС1-ДС15 та запобіжники FU1-FU7), які показані пунктиром на рис. 1, встановлені у реальному зразку перетворювача МПЧ-Т2ТТТ-418-690-50У3 для ВЕУ ТГ-1000 (розробка підприємства ТОВ НДІ «Перетворювач»).

У подальшому для потужних ВЕУ з метою докладнішої оцінки номінальних даних елементів захисту та швидкодії датчиків струму і системи керування перетворювача з урахуванням взаємного впливу між функціональними вузлами на розподіл струмів, необхідно розробити математичну модель та провести дослідження процесів у перетворювачі методом моделювання.

## ВИСНОВКИ

1. Вдосконалення електронних систем нейтралізації негативних наслідків роботи безмультиплікаторних ВЕУ в аварійних режимах сприяє підвищенню надійності та ефективності їх функціонування.

2. Для захисту досліджуваної схеми та підвищення надійності функціонування її в аварійних режимах необхідно використати швидкодіючі датчики миттєвих значень струмів через транзистори, а також запобіжники.

3. Аналіз можливих ситуацій струмових аварійних режимів дозволяє запропонувати схему розміщення захисних елементів багатоканального перетворювача частоти для ВЕУ з аеродинамічною мультиплікацією.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Голубенко Н. С. Моделирование электромеханической системы ВЭУ с аэродинамической мультипликацией в режиме стабилизации скорости ветровых турбин / Н. С. Голубенко, П. Д. Андриенко, И. Ю. Немудрый // Электротехника и электроэнергетика. – 2011. – № 1. – С. 13–20.

2. Андриенко П. Д. Реализация автономного режима работы ветроэлектрической установки типа ТГ-1000 / П. Д. Андриенко, В. С. Кражан, И. Ю. Немудрый // Вісник нац. тех. ун-ту ХПІ. – 2010. – № 28. – С. 343.
3. Кошелев К. С. Исследование и разработка средств защиты статического компенсатора реактивной мощности с цифровой системой управления: автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.09.01. «Электромеханика и электрические аппараты» / К. С. Кошелев. – Москва, 2008. – 20 с.
4. Костенко М. П. Электрические машины Ч. 2 / М. П. Костенко, Л. И. Пиотровский. – М.-Л.: «Энергия», 1985. – 704 с.
5. Колпаков А. И. Алгоритмы управления многоуровневыми преобразователями / А. И. Колпаков, Е. А. Карташев // Силовая Электроника. – 2009. – № 2. – С. 57–65.
6. Конспект лекцій за курсом «Автономні перетворювачі» для студентів спеціальності 7.090803 «Електронні системи» денної та заочної форм навчання / Укладач В. В. Семенов. – Запоріжжя: ЗДІА, 2007. – 101 с.
7. Шрайбер Д. А. Преобразователи высокой мощности для возобновляемых источников энергии / Шрайбер Д. А.; пер. с нем. А. И. Колпаков // Силовая Электроника. – 2010. – № 5. – С. 90–94.

Стаття надійшла до редакції 14.01.2013.

Після доробки 28.01.2013.

Конашук В. В.

Аспирантка, Запорожская государственная инженерная академия, Украина

#### **ОСОБЕННОСТИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ БЕЗМУЛЬТИПЛИКАТОРНЫХ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

*В статье исследованы процессы функционирования схемы превращения электрической энергии преобразователем частоты безмультипликаторной ветроэлектрической установки в аварийных режимах работы. Рассмотрены основные виды аварийных ситуаций данного преобразователя. Приведен подход к расчету тока короткого замыкания синхронного генератора и тока короткого замыкания LC-контура. Для защиты схемы и надежности функционирования в аварийных режимах предложены элементы защиты (предохранители, быстродействующие датчики тока).*

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, аварийный режим, синхронный генератор, выпрямитель, ветроэлектрическая установка.

Konashchuk V. V.

Graduate student, Zaporozhye State Engineering Academy, Ukraine

#### **CHARACTERISTICS OF EMERGENCY OPERATION OF FREQUENCY CONVERTERS OF WIND-POWER INSTALLATIONS WITHOUT MULTIPLYING GEAR**

*The article studies functioning of the scheme of transformation power through the converter wind-power installations during emergency operation. The main types of emergencies for this converter are considered. An approach to the calculation of short-circuit current of a synchronous generator and short-circuit current of an LC-circuit is presented. Protection elements (voltage limiters, fuses, fast current sensors) are given for circuit protection and the reliability in emergency conditions is offered. Unlike classic circuit diagrams for wind-power installations, the circuit diagrams without multiplying gear for turbo-generator wind-power installations have a self-stabilization effect of electromechanical system under optimal conditions in a wide range of a wind flow. In order to improve its effectiveness and implement an offline mode, you need to use converters to match the frequency of the generator voltage and that the frequency of network. Circuit diagrams of such converters have a complex structure, they contain a number of power supplies and rectifiers, capacitive storages, pulse converters and multi-level inverters.*

**Keywords:** frequency converter, emergency operation, synchronous generator, rectifier, wind-power installation.

#### **REFERENCES**

1. Golubenko N. S. Andrienko P. D., Nemudryj I. Ju. Modelirovanie jelektromehaničeskoj sistemy VJeU s ajerodinamičeskoj mul'tiplikaciej v rezhime stabilizacii skorosti vetrovyh turbin, *Jelektrotehnika i jelektrojenergetika*, 2011, No. 1, pp. 13–20.
2. Andrienko P. D., Krazhan V. S., Nemudryj I. Ju. Realizacija avtonomnogo rezhima raboty vetrojelektričeskoj ustanovki tipa TG-1000, *Visnik nac. teh. un-tu HPI*, 2010, No. 28, P. 343.
3. Koshelev K. S. Issledovanie i razrabotka sredstv zashhity statičeskoego kompensatora reaktivnoj moshhnosti s cifrovoj sistemoj upravlenija: avtoref. diss. na soiskanie uch. stepeni kand. tehn. nauk : spec. 05.09.01. «Jelektromehanika i jelektricheskie apparaty». Moskva, 2008, 20 p.
4. Kostenko M. P., Piotrovskij L. I. Jelektricheskie mashiny Ch. 2. Moskva-Leningrad «Jenergija», 1985, 704 p.
5. Kolpakov A. I., Kartashev E. A. Algoritmy upravlenija mnogourovnevnyimi preobrazovateljami, *Silovaja Jelektronika*, 2009, No. 2, pp. 57–65.
6. Semenov V. V. Ukladach Konspekt lektcii za kursom «Avtonomns peretvosuvachi» dlia studentiv spetsialnosti 7.0908 03 «Elektronni systemy» dennoi ta zaočnoi formy navchannia, *Zaporizhzhia, ZDIA*, 2007, 101 p.
7. Shrajber D. A.; per. c nem. A. I. Kolpakov Preobazovateli vysokoj moshhnosti dlja vozobnovljaemyh istočnikov jenergii, *Silovaja Jelektronika*, 2010, No. 5, pp. 90–94.