

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Саяно-Шушенский филиал

Кафедра гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических
систем и электрических сетей

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ А. А. Ачитаев
подпись
«___» _____ 2021 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ
ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ГЭС**

13.04.02. Электроэнергетика и электротехника
13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Научный руководитель	_____	Зав. кафедры ГГЭСС, СШФ СФУ, канд.техн.наук	А.А. Ачитаев
	подпись, дата		
Выпускник	_____		К.П. Синельникова
	подпись, дата		
Рецензент	_____	Зам. главного инженера по технической части Филиала ПАО «РусГидро» — «Саяно- Шушенская ГЭС имени П.С.Непорожнего»	Д.Ю. Рыбалко
	подпись, дата		
Нормоконтролер	_____		А.А. Чабанова
	подпись, дата		

Саяногорск; Черемушки 2021

АННОТАЦИЯ

Современное развитие коммутационной техники сейчас развивается по совершенствованию их управления и получению новых качеств, которые решают ряд эксплуатационных проблем. Одной из таких решений является использование управляемой коммутации в сетях собственных нужд ГЭС 6 кВ. Проблема ограничения перенапряжения является не новым, и сейчас существуют ряд как организационных, так и методологических подходов, позволяющих сформировать применение подобного рода коммутационного оборудование. Дело в том, что вакуумные выключатели в настоящее время являются приоритетно рекомендуемым коммутационным оборудованием для использования в сетях средних классов напряжения собственных нужд на ГЭС. Однако вместе с положительными эксплуатационными свойствами вакуумных выключателей наблюдаются и отрицательные: коммутируемое ими оборудование может повреждаться. Повреждения вызываются неблагоприятными процессами, сопровождающими коммутации вакуумных выключателей: перенапряжения, вызванные токами среза; эскалация перенапряжений при отключении в цикле высокочастотных (ВЧ) повторных пробоев; перенапряжения при включении в цикле ВЧ предварительных пробоев; перенапряжения в результате виртуальных токов среза.

Перечисленные процессы характерны только для выключателей с жёсткими дугогасящими средами, в число которых входит вакуум. Высокие кратности перенапряжений опасны в первую очередь для двигателей, уровень изоляции которых составляет порядка $2,8 U_{фм}$. Высокие частоты переходного процесса при коммутациях высоковольтных выключатели (сотни килогерц и единицы мегагерц) представляют серьёзную опасность для витковой изоляции высоковольтного оборудования, кабельных муфт и кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ).

Ключевые слова: электрическая сеть собственных нужд, вакуумный выключатель, управляемая коммутация, виды нагрузок, восстановительное напряжение.

АВТОРЕФЕРАТ

Тема магистерской диссертации: «Исследования алгоритмов управляемой коммутации вакуумных выключателей собственных нужд ГЭС».

Актуальность:

В настоящее время наблюдается интенсивный рост использования коммутационного оборудования на основе вакуумного оборудования в сети собственных нужд ГЭС, вместе с этим возникает необходимость обеспечения заявленных эксплуатационных характеристик. Дело в том, что значительный перенапряжения в вакуумных выключателях приводят к большому числу отказов. Это в свою очередь к недопустимому отказу в работе сети собственных нужд. В работе приводится анализ коммутационных перенапряжений при различных видах электрических нагрузок в сочетании с управляемой коммутации и предложение в использовании различных алгоритмов пофазового управления дугогасительной камерой.

Цель работы: анализ алгоритмов синхронной коммутации различных видов нагрузок включая мощные высоковольтные электродвигатели.

Основные задачи:

- провести анализ существующих видов средств по ограничению перенапряжений в электрических сетях;
- анализ фундаментальных принципов управляемой коммутации при различных видах нагрузок;
- разработка различных видов алгоритмов управляемой коммутации нагрузок в зависимости от применения характера заземления нейтрали трансформатора;
- возможность применения синфазной коммутации группы высоковольтных электродвигателей в сети собственных нужд.

Объект исследования: сеть собственных нужд ГЭС.

Структура и объем диссертации: работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Материал изложен на 74 страницах, содержит 62 рисунка и 12 таблиц.

Содержание работы:

В первой главе рассмотрена актуальность применения управляемой коммутации в сети собственных нужд. Рассмотрены теоретические положения, определяющие возможность получения математической модели перенапряжения в сети собственных нужд ГЭС. А также описаны меры ограничений от перенапряжений, на основании которых основана работа диссертации.

Во второй главе представлены имитационные макромодели анализа при синхронной коммутации в среде MatLab. Произведен анализ коммутации при различных отключения фаз по напряжению и току вакуумного выключателя. Сделаны выводы, произведен сравнительный анализ по полученным результатам.

В третьей главе приведена схема управления асинхронной машины через пуск инвертора. Произведено математическое описание асинхронной машины.

Рассмотрена структурная схема в среде MatLab. Приведены результаты моделирования процессов коммутации при различных условиях переключения фаз, сделаны выводы.

В четвертой главе проведен технико-экономический анализ высоковольтных выключателей при различных видах разрывов дуги. Приведен расчет экономических затрат. Сделан сравнительный анализ.

В заключении сформулированы основные результаты работы, даны рекомендации по снижению перенапряжения в сетях собственных нужд ГЭС. Представлен алгоритм оптимального переключения фаз при синхронной коммутации в собственных нуждах ГЭС для дальнейшего развития работы.

Дальнейшее развитие работы: следующим этапом служит анализ применимости алгоритмов в схемах собственных нужд под схемы выдачи мощности конкретных станций и создания программного обеспечения, позволяющих моделировать коммутационные перенапряжения.

Практическое применение: работа может послужить основой для предложения по модернизации схем собственных нужд существующих и проектируемых станций.

ABSTRACT

Theme of the master's dissertation: "Research of algorithms of controlled switching of vacuum circuit breakers of own needs of HPP".

Relevance:

Currently, there is an intensive growth in the use of switching equipment based on vacuum equipment in the network of own needs of hydroelectric power plants, along with this, there is a need to ensure the declared operational characteristics. The fact is that significant overvoltage in vacuum circuit breakers leads to a large number of failures. This in turn leads to an unacceptable failure in the operation of the network of its own needs. The paper presents an analysis of switching overvoltages under various types of electrical loads in combination with controlled switching and a proposal to use different algorithms for phase-by-phase control of the arc-extinguishing chamber.

The purpose of the work: to analyze algorithms for synchronous switching of various types of loads, including high-power high-voltage electric motors.

Main tasks:

- analyze the existing types of means to limit overvoltage in electrical networks;
- analysis of the fundamental principles of controlled switching for various types of loads;
- development of various types of algorithms for controlled switching of loads depending on the application of the nature of the transformer neutral ground;
- the possibility of using common-mode switching of a group of high-voltage electric motors in the network of their own needs.

Object of study: the network of own needs of hydroelectric power plants.

The structure and scope of the thesis: the work consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of sources used. The material is presented on 74 pages, contains 62 figures and 12 tables.

The content of the work:

In the first chapter, the relevance of the application of controlled switching in the network of own needs is considered. The theoretical provisions determining the possibility of obtaining a mathematical model of overvoltage in the network of own needs of hydroelectric power plants are considered. And also describes the measures of restrictions against overvoltage, on the basis of which the work of the dissertation is based.

The second chapter presents simulation macromodels of analysis in synchronous switching in the MatLab environment. The analysis of switching at various switching-off phases on the voltage and current of the vacuum circuit breaker is made. Conclusions are drawn, and a comparative analysis is made based on the results obtained.

The third chapter shows the control scheme of an asynchronous machine through the start of the inverter. The mathematical description of the asynchronous machine is made. A block diagram in the MatLab environment is considered. The

results of simulation of switching processes under different conditions of phase switching are presented, and conclusions are drawn.

In the fourth chapter, a technical and economic analysis of high-voltage circuit breakers with various types of arc breaks is carried out. The calculation of economic costs is given. A comparative analysis is made.

In conclusion, the main results of the work are formulated, recommendations are given to reduce overvoltage in the networks of own needs of hydroelectric power plants. An algorithm for optimal phase switching with synchronous switching in the HPP's own needs for further development of the work is presented.

Further development of the work: the next stage is the analysis of the applicability of algorithms in the schemes of their own needs for the schemes of power output of specific stations and the creation of software that allows you to simulate switching overvoltages.

Practical application: the work can serve as a basis for a proposal to modernize the schemes for the own needs of existing and projected stations.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 Общая характеристика перенапряжений.....	9
1.1 Внутренние перенапряжения и защита от них.....	9
1.1.1 Перенапряжения при отключении ненагруженных линий.....	12
1.1.2 Перенапряжения при отключении ненагруженных трансформаторов	14
1.1.3 Переходные процессы при включении трансформатора в сеть с синусоидальным напряжением.....	17
1.2 Классификация мер защиты.....	18
1.2.1 Меры ограничения внутренних перенапряжений.....	20
2 Разработка имитационных макромоделей анализа переходных процессов при синхронной коммутации в среде MatLab.....	25
2.1 Анализ коммутации по синхронному отключению по напряжению.....	30
2.2 Анализ коммутации по синхронному отключению по току.....	35
3 Исследование безударного переключения двигателей на работу от сети собственных нужд через промежуточный этап пуска инвертора.....	40
3.1 Моделирование привода переменного тока на базе асинхронной машины.....	42
3.1.1 Математическое описание обобщённой асинхронной машины.....	42
3.1.2 Структурная модель асинхронного двигателя в неподвижной системе координат.....	44
3.1.3 Математическая модель системы векторного управления асинхронного электропривода.....	47
3.1.4 Особенности настройки регулятора скорости.....	52
3.2 Моделирование подключения асинхронных машин к сети.....	57
3.2.1 Моделирование коммутации для алгоритма на отключение цепи частотного преобразователя с синхронизацией по напряжению.....	57
3.2.2 Моделирование синфазного переключения.....	61
4 Техничко-экономическая эффективность высоковольтных выключателей в сравнительном анализе при различных видах среды разрыва дуги (вакуум, элегаз, масло) и нового поколения вакуумного выключателя.....	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	71
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	73

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое развитие коммутационного оборудования связано с применением вакуумного выключателя по причинам их относительной простоты в эксплуатации, низкой стоимости и существенного сокращения габаритных размеров, благодаря чему их можно разместить в комплектном распределительном устройстве (КРУ) среднего напряжения.

Однако, проблема перенапряжения вследствие использования вакуумного выключателя приводит к необходимости применения ограничителей перенапряжения (ОПН), которые имеют нелинейную вольтамперную характеристику. К сожалению, к недостатку ОПН можно отнести низкий механический ресурс вследствие повреждения устройства, автоматически разрывающего цепь при перегрузке, где может возникнуть короткое замыкание в сети с последующим отключением.

В работе рассматриваются фундаментальные основы, заложенные в физику перенапряжения коммутационной камеры при синхронном (по фазном) управлении выключателя.

Цели и задачи данной работы указаны в автореферате к магистерской диссертации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Перенапряжения при коммутациях вакуумных выключателей / Базавлук А.А., Сарин Л.И., Энергоэксперт, № 2 – 2011
2. Базавлук, А. А., Сарин, Л. И., Михайловский, Г. Г., Наумкин, И. Е., Гоголюк В. В. Перенапряжения при коммутациях вакуумных выключателей //Москва. – 2011. – С. 27-32
3. Ачитаев, А. А., Павлюченко, Д. А., Прохоренко, Е. В., Шевцов, Д. Е. Применение синхронной коммутации для ограничения коммутационных перенапряжений в электросетях //Главный энергетик. – 2014. – №. 3. – С. 42-49.
4. Ачитаев, А. А., Павлюченко, Д. А., Прохоренко, Е. В., Шевцов, Д. Е. Применение синхронного вакуумного выключателя в городских электрических сетях //Главный энергетик. – 2014. – №. 7. – С. 46-52
5. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения, и защита от них // Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004
6. Переходные процессы при включении трансформатора в сеть с синусоидальным напряжением / С. Котенев, А. Евсеев, Силовая электроника, № 4. 2005
7. Исследование коммутационных перенапряжений вызванных отключением электродвигателей основного оборудования кислородно-конвертерных производств / А.Н. Шпиганович, К.Д. Захаров, К.А. Пушница. Вести высших учебных заведений Черноземья, №1(19). 2010
8. Исследование возможности создания вакуумного выключателя для синхронного отключения ненагруженных трансформаторов / Прохоренко Е.В., Лебедев И.А., ЭЛЕКТРО, 3'2010
9. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них // Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004
10. Комплексная система диагностики выключателей с системой синхронного управления выключателем. Руководство по эксплуатации. ОБП.140.240 РЭ.
11. Переходные процессы при коммутации конденсаторных установок - Конденсаторные установки промышленных предприятий. Режим доступа: [<http://forca.ru/knigi/oborudovanie/kondensatornye-ustanovki-promyshlennyh-predpriyatiy-7.html>]
12. Кочетков В. П. Основы электропривода. Абакан: ХТИ – филиал СФУ, 2007 г
13. Важнов А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия, 1980
14. Каталог конденсаторных установок [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.jetenergy.net/photoarchive/>
15. Онлайн расчёт конденсаторных батарей [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.skrutka.ru/sk/tekst.php?id=13>
16. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: Учебное пособие.-СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.


17. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: Корона принт, 2001.- 320с.
18. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/А90.-М.: Энергоиздат, 1982.-504 с., ил.
19. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений.-М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.-496 с.
20. X. Li, R. Duke and S. Round. Development of a three-phase three-level inverter for an electric vehicle. Australasian Universities Power Engineering Conf., Darwin, Australia, 1999, pp. 247-251
21. H.F. Abdul Wahab, H. Sanusi. Simulink Model of Direct Torque Control of Induction Machine. American Journal of Applied Sciences 5 (8): 1083-1090, 2008
22. Kyo-Beum Lee, FredeBlaabjerg. Improved Direct Torque Control for Sensorless Matrix Converter Drives with Constant Switching Frequency and Torque Ripple Reduction. International Journal of Control, Automation, and Systems, vol. 4, no. 1, pp. 113-123, February 2006
23. Mohamed Kadjoudj, SoufianeTaibi, NoureddineGolea. Modified Direct Torque Control of Permanent Magnet. Synchronous Motor Drives International Journal of Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering IJ-STA, Volume 1, N° 2, December 2007, pp. 167–180.
24. Волянский С. М. Сравнительный анализ регуляторов, применяемых в системах управления энергосберегающим электроприводом постоянного тока / С. М. Волянский, Я. Б. Волянская // Вестник КГПУ им. Михаила Остроградского. – 2008. – Выпуск 4(51). – С. 106-108.
25. Новиков С. И. Оптимизация автоматических систем регулирования теплоэнергетического оборудования / С. И. Новиков. – Новосибирск: НГТУ, 2006. – 108 с.
26. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов / В.Я. Ротач. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Саяно-Шушенский филиал

Кафедра гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических
систем и электрических сетей

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 А. А. Ачитаев
подпись

« 17 »  2021 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ
ВАКУУМНЫХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ГЭС

13.04.02. Электроэнергетика и электротехника
13.04.02.06 Гидроэлектростанции

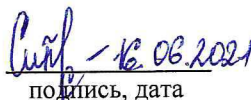
Научный
руководитель


подпись, дата

Зав. кафедры ГГЭСС,
СШФ СФУ,
канд.техн.наук

А.А. Ачитаев

Выпускник


подпись, дата

К.П. Синельникова

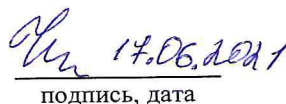
Рецензент


подпись, дата

Зам. главного инженера
по технической части
Филиала ПАО
«РусГидро» — «Саяно-
Шушенская ГЭС имени
П.С.Непорожного»

Д.Ю. Рыбалко

Нормоконтролер


подпись, дата

А.А. Чабанова

Саяногорск; Черемушки 2021