Институт физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра РАН

На правах рукописи

Селиванов Василий Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ВОЗДУШНЫХ СЕТЯХ 35 КВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЯ

Специальность 05.14.12 - Техника высоких напряжений

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук Ефимов Б.В.

Апатиты - 2003

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

Глава 1 Анализ проблемы феррорезонансных перенапряжений §1.1. Физическая сущность явления § 1.2. Классификация феррорезонансных схем

§1.3. Обзор существующих методик анализа феррорезонансных схем в сетях 6-35 кВ § 1.4. Цель и задачи исследования

Глава 2 Метод анализа феррорезонансных процессов в сетях с нелинейными индуктивностями §2.1. Общие допущения при моделировании феррорезонансных схем

§ 2.2. Метод расчета феррорезонансных схем

§ 2.3. Выбор методов численного интегрирования

§2.4. Программа для анализа разветвленных сетей 35 кВ на

возможность возникновения феррорезонанса.

§ 2.5. Результаты численного расчета

Г лава 3 Математическая модель трансформатора напряжения 3HOM-35 § 3.1. Конструкция и схемы включения трансформатора напряжения 3HOM-35

§3.2. Расчетная модель трансформатора напряжения ЗНОМ -35-65 §3.3. Аппроксимация кривой намагничивания трансформатора напряжения 3HOM-35 Глава 4 Численное исследование области существования устойчивых феррорезонансных колебаний §4.1. Основные положения и допущения

§ 4.2. Резонансная область для случая малых активных потерь

§ 4.3. Резонансная область без дополнительных защитных устройств

4.3.1. Общая характеристика области

4.3.2. Участок феррорезонанса на частотах, близких к 25 Гц

4.3.3 Участок с преобладающей частотой феррорезонанса 50 Гц 122

4.3.4. Феррорезонанс на частотах, близких ко второй гармонике

сети 130

4.3.5. Феррорезонанс на частоте третьей гармоники сети 135 § 4.4. Влияние начального угла э.д.с. в момент включения напряжения

сети. 138

Глава 5 Защита сети с изолированной нейтралью с ТН ЗНОМ - 35 от

феррорезонансных перенапряжений 142

§5.1. Сравнительный анализ различных способов подавления феррорезонанса с использованием ортогональных фазных переменных 142

§ 5.2. Защита трансформатора напряжений от феррорезонанса с

помощью активных сопротивлений 152

§ 5.3. Анализ дополнительных погрешностей, вносимых защитными ^ устройствами 158

§ 5.4. Экспериментальные исследования феррорезонансных процессов

в сетях 35 кВ и анализ опыта их подавления 166

Заключение 171

Литература 175

Заключение

ОднойизсамыхактуальныхзадачсовременнойэлектроэнергетикиРоссииявляетсясохранениетехническогоуровняатакжеобеспечениеиповышениенадежностиэксплуатациистареющегооборудованияэнергосистемприотсутствиифинансовыхвозможностейегомассовойзаменыКтакимпроблемамнесомненноотноситсязадачасниженияаварийностивраспределительныхсетяхвтомчислеипопричиневыходаизстрояизмерительныхтрансформаторовнапряженияВдиссертациинаосновеанализаопытаэксплуатациилитературныхданныхиоригинальныхисследованийпоказаночтоосновнойпричинойаварийТНтрадиционныхконструкцийявляетсятепловойпробойизоляциивызванныйповышеннымитокамивпервичныхобмоткахпридлительныхферрорезонансныхколебанияхВтрехфазныхсетяхфизическиреализуемымногочисленныевидытакихколебанийсразличнымиспектрамичастотиамплитудтоковинапряженийвнейтралиПринапряженияхсетиблизкихкноминальномувреальныхсетяхмогутвозникатьдлительныеколебаниязначительныхамплитудспреобладающимичастотамивспектреотдоГцПодавлениеферрорезонансныхявленийспомощьюустановкирезистороввпервичныеивторичныеобмоткиТНатакжевнейтральсетиоказываетсявразличнойстепениэффективнойвзависимостиотсуммарнойдлинылинийемкостиназемлюнаизолированноработающемучасткесетиВразличныхрабочихиаварийныхрежимахчислоиколичестволинийиподстанцийнатакихучасткахсетиможетсущественноизменятьсяСоответственноизменяетсячислокомплектовТНвключенныхподнапряжениеивширокихпределахменяетсяэквивалентнаяемкостьсетичтозатрудняетвыборзащитныхмериусложняеттеоретическийанализихэффективностиНаосновеподробногоисследованиявработепредложенывдостаточнойстепениуниверсальныеспособызащитынапримересетиклассанапряжениякВкоторыепровереныэкспериментальноивнедренынаподстанцияхОАОКолэнерго





Поработеможносделатьследующиевыводы

 ВдиссертациивыполненкомплекстеоретическихиэкспериментальныхисследованийферрорезонансныхпроцессоввтрехфазныхсетяхсизолированнойнейтральювпервыеохватывающийвсемногообразиеформиамплитудколебанийвширокомдиапазонеизмененияпараметровинапряженийсетиВчастностивцеляхисследованияфизикипроцессаполученыподробныекартинырезонансныхобластейдляэквивалентныхемкостейсетиотпФдосотеннФинапряженийотдономинальныхнапряженийсетитоестьвдиапазонахвключающихизначительнопревышающихреальныепределыизмененияэтихвеличин

 НаосновеполученныхвработеэкспериментальныхданныхирасчетнымпутемуточненыформулыаппроксимирующиекривуюнамагничиваниятрансформаторовнапряжениянапримереиобоснованаструктураегоэквивалентнойсхемыдлявключениявтрехфазнуюсхемузамещениясетиПроведенвыбороптимальныхформулпокритериютрудоемкостьсчетаточностьрезультатовграницрезонансныхобластейРекомендованыдляиспользованиявмноговариантныхрасчетахобычныеполиномиальныеаппроксимациисуточненнымичисленнымизначениямикоэффициентовиаппроксимациивпределеучитывающиеиндуктивностьрассеянияТН

 ИсследованыфизическиепроцессывызывающиедлительныеферрорезонансныеколебанияспреобладающимичастотамивспектреотединицгерцдоГцпоказаночтоихвозникновениеобусловленоименноспецификойтрехфазныхсетейПоказаночтотрехфазнаясимметричнаясистема

эдсвсетиснасыщающимисятрансформаторамиприопределенныхкомбинацияхнапряженияиемкостиявляетсягенераторомвторойсубгармоникивпервыепериодыпослевключениячтопослезатуханияпереходногопроцессаприводиткразвитиюустойчивыхколебанийначастотахблизкикполовинепромышленнойВыполненанализдвухфазногорезонансаначастотесетиВметодическихцеляхпроанализированыявленияначастотахприближающихсяковторойитретьейгармоникам



 ПутемчисленногомоделированиянайденыобластисуществованиякаждогоизвидовнелинейныхколебанийвкоординатахнезависимыхпеременныхемкостьсетилинейноенапряжениесетиРасчетывыполненысшагамипонезависимымпеременнымдостаточномалымидлявыявлениятонкихэффектоввизмененииспектровферрорезонансныхколебанийИсследованыучасткинепрерывногоизмененияпреобладающейчастотыколебанийивпервыеобнаруженыучасткифрактальноготипасхаотическимраспределениемпреобладающихчастотколебанийтребующиедальнейшейразработкиновыхподходовкихисследованию 

 ПоказаночтовобластиизмененияреальныхнапряженийсетимогутвозникатьколебаниязначительныхамплитуднапряженийвнейтралиитоковвТНначастотахотГцдоГцПриэтомнижняяграницарезонанснойобластивсегдаопределяетсяколебаниямисчастотамиблизкимиковторойсубгармоникеВтожевремяпривключениисетиподноминальноенапряжениесмалойэквивалентнойемкостьюназемлюосновнымвидомколебанийявляетсядвухфазныйферрорезонанснапромышленнойчастоте

 РазработанметодсравнительногоанализаэффективностиразличныхметодовзащитыэлектрическихсетейотФРПпосредствомортогонализациинелинейныхуравненийферрорезонансныхколебанийвтрехфазнойсетипутемразложениянакоординатыВыделеннелинейныйконтурнулевойпоследовательностиизанализапроцессоввкоторомнаиболеечетковиднасравнительнаяэффективностьразличныхметодовзащитыдлясетейсразличнымипараметрами

 ПоказаночтовреальныхэлектрическихсетяхэффективнойявляетсякомплекснаязащитаотферрорезонансныхперенапряженийвключающаяустановкурезистивныхустройствпоследовательноспервичнойобмоткойивразомкнутыйтреугольникдополнительныхвторичныхобмотокДлябольшинстваучастковсетейсопротивлениякОмиОмсоответственногарантированноустраняютопасностьвозникновенияферрорезонансныхперенапряжений





 ВпервыеобоснованочтозащитныерезисторыспервичнойсторонымогутустанавливатьсянатрансформаторахнапряженияккоторымнепредъявляютсятребованиявысокойточностиизмерениянапряженияНакаждомучасткесетисодержащемдосемикомплектовТНдостаточноустановитьзащитувобмоткахвысшегонапряжениятольководномизних

 ВыполненыэкспериментальныеисследованияферрорезонансныхпроцессоввдействующихсетяхСопоставлениеопытныхирасчетныхданныхподтвердилиправильностьосновныхположенийдиссертационнойработыОпытнымпутемподтвержденаэффективностькомплекснойзащитытрансформаторовнапряженияотферрорезонансовпримногочисленныхкоммутацияхвсетисустановленнымизащитнымиустройстваминезарегистрированониодногослучаявозбуждениядлительныхрезонансныхявленийЗащитныеустройствауспешноэксплуатируютсявтечениерядалетнанесколькихподстанцияхкВОАОКолэнерго

 РазработаныразличныевариантыисполнениярезистивнойзащитывтомчислеоригинальнаяконструкциярезистивныхзащитныхустройствподвесноготипапроверенныхвтяжелыхклиматическихусловияхКрайнегоСевераивнедряемыхвнастоящеевремяввысоковольтныхсетях