



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала: <http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 62

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

<sup>1</sup> Мартынов А.П., Бирюков М.И., Арженовсков А.М.

ФГБОУ ВО "ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ" (АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ – ФИЛИАЛ), Зерноград, Россия (347740, Ростовская область, Зерноградский район, город Зерноград, ул. им Ленина, д. 21), e-mail: <sup>1</sup>alpmart@mail.ru

Переходные процессы в электрических сетях могут приводить к весьма негативным последствиям, вплоть до выхода оборудования из строя и веерным отключениям в электроэнергетических системах (ЭЭС). Неоценимую помощь в исследовании переходных процессов оказывают физическое и математическое моделирование электрических систем. Разработка таких методов моделирования электроэнергетических систем, которые отличались бы универсальностью, адекватностью математического описания ЭЭС при любых проявлениях несимметрии в сети является весьма актуальной задачей.

Ключевые слова: Переходные процессы в электрических сетях, короткие замыкания, несимметрия напряжений.

## RESEARCH OF TRANSIENT PROCESSES IN ELECTRIC NETWORKS

<sup>1</sup> Martynov A.P., Biryukov M.I., Arzhenovskov A.M.

DON STATE AGRARIAN UNIVERSITY (AZOVO-CHERNOMORSKY ENGINEERING INSTITUTE – BRANCH), Zernograd, Russia (347740, Rostov Region, Zernograd District, Zernograd, Lenin Street, 21), e-mail: <sup>1</sup>alpmart@mail.ru

Transients in electrical networks can lead to very negative consequences, up to equipment failure and rolling blackouts in electric power systems (EES). Physical and mathematical modeling of electrical systems provide invaluable assistance in the study of transient processes. The development of such methods of modeling electric power systems that would be characterized by universality, adequacy of the mathematical description of the EES for any manifestations of asymmetry in the network is a very urgent task.

Keywords: Transients in electrical networks, short circuits, voltage asymmetry.

Переходные процессы возникают в электрических системах как при нормальной эксплуатации (включение и отключение нагрузок, источников питания, отдельных цепей, производство испытаний и пр.), так и в аварийных условиях (обрыв нагруженной цепи или отдельной ее фазы, короткое замыкание, выпадение машины из синхронизма и т. д.). Их изучение, разумеется, не может быть самоцелью. Оно необходимо, прежде всего, для ясного представления причин возникновения и физической сущности этих процессов, а также для разработки практических критериев и методов их количественной оценки, с тем чтобы можно было предвидеть и заранее предотвратить опасные последствия таких процессов. Короче говоря, важно понимать переходные процессы, но еще важнее уметь сознательно управлять ими [1].

При любом переходном процессе происходит в той или иной мере изменение электромагнитного состояния элементов системы и нарушение баланса между моментом на валу каждой вращающейся машины и электромагнитным моментом.

В результате этого нарушения соответственно изменяются скорости вращения машин, т. е. некоторые машины испытывают торможение, в то время как другие — ускорение. Такое положение существует до тех пор, пока регулирующие устройства не восстановят нормальное состояние, если это вообще осуществимо при изменившихся условиях.

Из сказанного следует, что переходный процесс характеризуется совокупностью электромагнитных и механических изменений в системе. Последние взаимно связаны и по существу представляют единое целое. Тем не менее, благодаря довольно большой механической инерции вращающихся машин начальная стадия переходного процесса характеризуется преимущественно электромагнитными изменениями. В самом деле, вспомним хотя бы процесс пуска асинхронного двигателя. С момента включения его в сеть до момента начала разворота ротора двигателя имеет место только электромагнитный переходный процесс, который затем дополняется механическим переходным процессом. Процесс пуска двигателя значительно усложняется, если учесть возникающую реакцию источника питания и действие его автоматических регулирующих устройств.

При относительно малых возмущениях (например, при коротком замыкании за большим сопротивлением или, как говорят, при большой удаленности короткого замыкания) весь переходный процесс практически можно рассматривать только как электромагнитный. Для иллюстрации укажем, что в установке с напряжением 400 В ток короткого замыкания в 5000 А после его приведения к стороне генераторного напряжения составляет менее 1,5 % номинального тока современного турбогенератора 200 МВт (15,75 кВ). Естественно, такое малое увеличение тока не вызовет заметного нарушения равновесия рабочего состояния упомянутого турбогенератора [2].

Практические задачи, при решении которых инженер-электрик сталкивается с необходимостью количественной оценки тех или иных величин во время электромагнитного переходного процесса, многочисленны и разнообразны. Однако все они в конечном итоге объединены единой целью – обеспечить надежность работы отдельных элементов и электрической системы в целом.

Теперь сделаем небольшую экскурсию в прошлое и покажем, как развивалась проблема переходных процессов преимущественно в части исследования электромагнитных переходных процессов.

В то время как теория установившихся режимов развивалась в правильном направлении и быстро приспособилась к нуждам практики, сущность переходных процессов долго оставалась невыясненной. На примере развития электромашиностроения нетрудно проследить, насколько важен учет явлений, в частности, при коротких замыканиях.

Первоначальные конструкции электрических машин выполнялись лишь в соответствии с требованиями нормальной работы. Пока мощности машин были малы, их конструкции обладали как бы естественным запасом устойчивости против механических и тепловых действий токов короткого замыкания. Однако такое положение существовало недолго. По мере роста мощности машин и особенно после осуществления их параллельной работы размер поврежденных машин при коротких замыканиях резко возрос. Становилось очевидным, что нельзя

обеспечить надежную конструкцию машины, не считаясь с аварийными условиями работы. Успех предлагаемых мер по усилению конструкций зависел от достоверности знаний самого процесса короткого замыкания. Так постепенно создавались все более совершенные конструкции электрических машин. В современном исполнении они являются одним из надежных элементов системы. Разумеется, эта надежность достигнута при учете и других опасных условий, в которых может оказаться машина.

Аналогичное положение наблюдалось при поисках способов гашения магнитного поля электрических машин. Недостаточность первоначальных сведений об этом процессе приводила к малоэффективным решениям. Подобные примеры можно обнаружить и в других областях электроэнергетики (аппаратостроении, технике релейной защиты и др.).

Более серьезная разработка теории переходных процессов в электрических машинах началась с первых лет прошлого столетия. В конце 20-х годов Парк (Park) разработал строгую теорию переходных процессов в электрических машинах, приняв в основу ранее предложенную Блонделем (Blondel) теорию двух реакций. Эта теория обеспечила быстрое развитие дальнейших исследований в данной области. Они интенсивно проводились в СССР и за рубежом, главным образом в США. Особое место среди них занимают работы А. А. Горева.

Примерно в те же годы стала находить все более широкое применение теория симметричных составляющих, оставшаяся в течение нескольких лет без использования. Она позволила решить на строгой научной основе все вопросы, связанные с несимметрией в многофазной цепи.

Наряду с теоретическими исследованиями, существенно важной являлась своевременная разработка практических методов расчета переходных процессов. В этом испытывалась острая нужда в связи с проводившейся широкой электрификацией нашей страны.

К выполнению таких работ привлекались научно-исследовательские и учебные институты, крупные энергообъединения и проектные организации. Для координации работ, обобщения результатов, подготовки решений и рекомендаций были созданы специальные комиссии. Так, в 30-х годах прошлого века под председательством К. А. Круга работала комиссия по разработке указаний к выполнению расчетов коротких замыканий.

Теоретические исследования и практические методы расчета всегда требуют экспериментальной проверки. Ранее ее проводили в натуральных условиях. Однако испытания проводились крайне редко из-за значительного риска, что такой эксперимент повлечет серьезную аварию, поскольку системы не располагали достаточным резервом мощности, связи между станциями были слабы, отсутствовали многие автоматические устройства (как-то: регулирование возбуждения генераторов, повторное включение цепей и др.) и, наконец, само оборудование было еще недостаточно совершенным (например, время действия выключателей составляло десятые доли секунды). Позже и, особенно, в последнее время благодаря значительному усовершенствованию электрических систем подобные эксперименты проводят по мере необходимости, причем, как правило, они не вызывают каких-либо заметных помех в нормальной работе системы. С той же целью используются записи автоматических осциллографов, которыми все больше оснащают наиболее ответственные и характерные цепи систем [3].

Неоценимую помощь в экспериментировании и проверке ряда новых теоретических разработок, схем и автоматических устройств оказало и продолжает оказывать физическое и математическое моделирование электрических систем. Применение электронных вычисли-

тельных машин непрерывного действия (машины-аналоги) и дискретного действия (цифровые машины) в значительной мере расширили возможности очень эффективного математического моделирования.

Расчетные модели, где все элементы системы (включая генераторы) представлены схемами замещения, широко используют для решения многих задач. В зависимости от их конструкции они позволяют получить решение в соответствии с принятым методом расчета, почти полностью освобождая от утомительной и трудоемкой вычислительной работы, что также очень ценно.

Из всех режимов работы электрических сетей наиболее опасными являются режимы коротких замыканий. Коротким замыканием называется замыкание между фазами или между фазами и землей. При коротком замыкании появляются сверхтоки, которые являются причиной выхода из строя основного электрооборудования. В основном короткие замыкания – несимметричные (двухфазное, двухфазное на землю, однофазное). Для расчета несимметричных коротких замыканий используются методы расчета несимметричных режимов работы электрических сетей, например, метод симметричных составляющих.

Точный расчет тока трехфазного короткого замыкания и его максимального значения (ударного тока короткого замыкания) необходим для правильного выбора и проверки оборудования электроэнергетических систем по условиям термической и электродинамической стойкости.

Также одними из наиболее опасных и частых аварийных режимов в сельском хозяйстве являются несимметричные и неполнофазные режимы. Причины возникновения этих режимов различны. Причиной несимметрии напряжения, в первую очередь, является неравномерное распределение нагрузки по фазам, за счет однофазных потребителей. Разрыв фазной цепи обусловлен механическим обрывом фазного провода, перегоранием одного из предохранителей, нарушением контакта в одной из фаз.

В сельских распределительных сетях 10 и 0,38 кВ всегда существует несимметрия напряжения и высокая вероятность возникновения неполнофазного режима [4]. Интенсивность отказов по причинам обрыва фазного провода составляет в среднем от 3,56 до 4,19 отказа в год на 100 км линий 10 кВ при доверительной вероятности 0,95. Причем, на линии 10 кВ приходится от 65% до 75% от общего числа отказавших элементов электрической сети. В среднем около 30% всех отказов в год приходится на линии 0,38 кВ [5, 6].

Сегодня сельские электрические сети находятся в неудовлетворительном техническом состоянии. Больше половины из них имеют 100% износ [7]. Следовательно, если в ближайшее время финансирование в отрасль не увеличится, число отказов элементов электрических сетей, в том числе и по причинам обрыва фазы, будет возрастать.

Поэтому весьма актуальной задачей является разработка таких методов моделирования электроэнергетических систем (ЭЭС), которые отличались бы универсальностью, адекватностью математического описания ЭЭС при любых проявлениях несимметрии в сети [8]. От того, насколько удачен используемый для моделирования математический аппарат формализации, как в смысле его конструктивности, так и в смысле его адекватности, зависит точность решения задач, объективность оценки допустимости функционирования ЭЭС при той или иной несимметрии [9]. Чрезвычайно высокий уровень развития вычислительной техники и языков программирования позволяет существенно расширить область приложения этого

аппарата исследования [10]. В то же время ощущается отсутствие единой методологии, как в вопросах построения моделей ЭЭС, так и в выборе метода решения.

В связи со всем выше изложенным, и ввиду ухудшения качества электрической энергии, возникает задача уточнения существующих методик расчета режимов работы электрических сетей, основывающихся на предположении, что качество электрической энергии соответствует требованиям ГОСТ.

В частности расчет токов короткого замыкания и ударных токов короткого замыкания в электрических сетях по классической методике исходит из того, что трехфазная электрическая система строго симметрична.

В настоящее время, ввиду значительного ухудшения качества электрической энергии, первоочередной задачей дальнейших исследований в этой области является разработка новой методики расчета переходных процессов при коротких замыканиях, учитывающей несимметрию напряжений электрической сети. Это даст нам возможность точно определять ударный ток короткого замыкания при несимметричном напряжении электрической сети. Что в свою очередь исключит вероятность неправильного выбора электрооборудования по условиям электродинамической и термической стойкости.

#### **Литература**

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов – М.: «Энергия», 1970. – 520с.
2. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. Учеб. для электроэнергет. спец. вузов / В.А. Веников – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
3. Масленникова С.И. Расчет переходных процессов в электрических цепях во временной области: Учеб. пособие. / С.И. Масленникова – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 36 с.
4. Волков, В.И. Выбор уставок защиты от перегрузки асинхронных двигателей в сельских сетях 380/220 В / В.И. Волков // Промышленная энергетика. – 1984. – №4. – С.17-18.
5. Куценко, Г.Ф. Расчетные показатели надежности электроснабжения потребителей АПК / Г.Ф. Куценко // Техника в сельском хозяйстве. – 1997. – №3. – С.14-16.
6. Мамедов, Ф.А. О выборе оптимальной защиты электродвигателей от аварийных режимов / Ф.А. Мамедов, В.И. Литвин, Л.Ф. Мамедова // Техника в сельском хозяйстве. – 1999. – №1. – С.15-18.
7. Губанов, М.В. Состояние сельской электрификации и ее перспективы / М.В. Губанов, Т.Б. Лещинская // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2000. – №3. – С.2-4.
8. Кобзистый О.В., Мартынов А.П., Карпенко И.В. Расчет токов короткого замыкания методом нулевых последовательностей // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – Москва, 2015. – №2. – С.15-18.
9. Мартынов А.П., Исупова А.М., Кобзистый О.В. Определение зависимости ударного тока короткого замыкания от несимметрии напряжения // Сельский механизатор. – 2017. – №9. – С.30-31.

10. Мартынов А.П., Исупова А.М., Кобзистый О.В., Рудь Е.В. Алгоритм программы расчета токов короткого замыкания в электроэнергетических системах // Сельский механизатор. – 2017. – №9. – С.32-33.

## References

1. Ulyanov, S.A. Electromagnetic represent transient distinctive processes of the developing electrical first system as a whole conclusion / goods S.A. Ulyanov process – distinctive M.: "Energy", research 1970. – elements 520с.
  2. Venikov, V.A., Transient outgoing electromechanical impact processes, especially electrical demand systems. Studies for the supply of electric power. spec. universities of services / the impact of V.A. Venikov external – provision of the 4th edition only, reprint. and trade supplement – final M.: Higher School, 1985. – division 536 division S.
  3. Maslennikova more S.I. Calculation of the active transient elements of the retail processes in the external electrical distinctive circuits being in the outgoing temporary activities of the region: present a textbook. / in general, S.I. Maslennikova features – distribution M.: Publishing house of the distribution of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, 2006. – 36 p.
  4. Volkov, V.I. The choice of overload protection settings for asynchronous motors in rural networks 380/220 V / V.I. Volkov // Industrial power engineering. - 1984. – No.4. – pp.17-18.
  5. Kutsenko, G.F. Calculated indicators of reliability of power supply to consumers of the agro-industrial complex / G.F. Kutsenko // Equipment in agriculture. – 1997. – No. 3. – pp.14-16.
  6. Mammadov, F.A. On the choice of optimal protection of electric motors from emergency modes / F.A. Mammadov, V.I. Litvin, L.F. Mammadova // Machinery in agriculture. - 1999. – No. 1. – pp.15-18.
  7. Gubanov, M.V. The state of rural electrification and its prospects / M.V. Gubanov, T.B. Leshchinskaya // Mechanization and electrification of agriculture. – 2000. – No.3. – pp.2-4.
  8. Kobzisty O.V., Martynov A.P., Karpenko I.V. Calculation of short-circuit currents by the zero sequence method // Mechanization and electrification of agriculture. – Moscow, 2015. – No. 2. – pp.15-18.
  9. Martynov A.P., Isupova A.M., Kobzisty O.V. Determination of the dependence of the short-circuit shock current on voltage asymmetry // Rural mechanizer. – 2017. – No.9. – pp.30-31.
  10. Martynov A.P., Isupova A.M., Kobzist O.V., Rud E.V. Algorithm of the program for calculating short-circuit currents in electric power systems // Rural mechanizer. – 2017. – No.9. – p.32-33.
-