

УДК 621.31

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Смыков Юрий Николаевич¹, доцент кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника»
e-mail: sws1007@mail.ru

¹ Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия

Аннотация. Статья посвящена поиску путей обеспечения электромагнитной совместимости, в том числе, при электроснабжении судовой электроэнергетической системы от судовых источников электрической энергии, а также береговых источников электрической энергии во время стоянки. Рассматривается влияние концентрированных потребителей электрической энергии на показатели качества, в том числе в части появления и влияния кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по провалу напряжения. Предложен ряд технических мероприятий, обеспечивающих снижение воздействия ЭМП помехи.

Ключевые слова: кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха; электромагнитная совместимость.

THE FORMATION OF VOLTAGE FAILURES IN THE POWER SUPPLY OF CONCENTRATED CONSUMERS

Yuri N. Smykov¹, Associate Professor of the Department of «Electric Power Systems and Electrical Engineering»
e-mail: sws1007@mail.ru

¹ Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

Abstract. The article is devoted to finding ways to ensure electromagnetic compatibility, including when supplying the ship's electrical power system with electricity from ship sources of electrical energy, as well as shore sources of electrical energy during mooring. The influence of concentrated consumers of electrical energy on quality indicators is considered, including in terms of the appearance and influence of conductive low-frequency electromagnetic interference on voltage failure. A number of technical measures are proposed to reduce the impact of EMF interference.

Keywords: conductive low-frequency electromagnetic disturbance; electromagnetic compatibility; electricity system; technical means for interference suppression.

Международное сообщество уделяет значительное внимание вопросам снижения уровня загрязнения окружающей среды [1] и повышению уровня энергоэффективности. Одним из элементов решения данной задачи является применение электрических машин значительной мощности или концентрированных потребителей, который обладают высокими технико – экономическими показателями. Мощность указанных потребителей, как правило, составляет 1 МВт и выше. Однако во время запуска концентрированного потребителя, исходя из уравнения баланса мощности и в условиях существенного изменения потребляемой активной и реактивной мощности, происходит резкое снижение напряжения в питающем узле, что в свою очередь оказывает влияние на вероятность появления кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения, что приводит к снижению качества электрической энергии.

Качество электрической энергии — это степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей качества электрической энергии. [ГОСТ 32144— 2013, статья 3.1.38].

Актуальность данного направления обусловлена значительными экономическими потерями, являющихся следствием отклонения показателей качества электрической энергии при появлении ЭМП.

В качестве примера концентрированной нагрузки, рассмотрим судовую автоматизированную электроэнергетическую систему во время стоянки в порту и подключенную к береговой сети через электропередачу «берег – судно». Так как в общем случае вероятность возникновения кондуктивной низкочастотной помехи по провалу напряжения вследствие подключения концентрированной нагрузки зависит от соотношения мощностей короткого замыкания в приемной и передающей системах, то определяющим фактором возникновения указанной помехи является не абсолютное значение мощности концентрированного потребителя, а соотношение

$$\frac{\delta X_{\text{пр}}}{\delta X_{\text{п}}} \approx f \frac{S_{\text{к,п}}}{S_{\text{к,пр}}}, \quad (1)$$

где $\delta X_{\text{пр}}$, $\delta X_{\text{п}}$ – соответственно, кондуктивная низкочастотная ЭМП в приёмной и передающей системе, %;

$S_{\text{к,п}}$, $S_{\text{к,пр}}$ – полные мощности трёхфазных КЗ в этих системах, кВА.

Прежде всего отметим, что электромагнитная обстановка в сетях общего назначения определяется n -ым количеством стационарных случайных процессов, обусловленных нестандартными показателями КЭ. Все эти случайные процессы формируют единый сложный электромагнитный процесс.

Исчерпывающая информация о таком сложном случайном процессе содержится в его многомерной интегральной функции распределения

$$F_n(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n; t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n) = P(X_1 \leq X_1, X_2 \leq X_2, \dots, X_i \leq X_i, \dots, X_n \leq X_n) \quad (2)$$

Эта функция характеризует вероятность того, что в момент времени t_i случайная величина X_i не превысит определенного своего значения.

Многомерная дифференциальная функция распределения вероятности определяется по формуле

$$P_n(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n; t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n) = \frac{\partial^n F_n}{\partial X_1 \partial X_2 \dots \partial X_i \dots \partial X_n} \quad (3)$$

Для нормализации сложного электромагнитного процесса в сетях общего назначения необходимо подавить кондуктивные ЭМП, распространяющиеся по сетям. Осуществить это можно путем применения специальных мер по помехозащищенности и по повышению помехоустойчивости СЭС. При этом под помехозащищенностью понимается способность ослаблять действия кондуктивных ЭМП за счет специальных помехозащитных средств



(ПЗС) не относящихся к принципу действия или построения СЭС. Помехоустойчивость (ПУ) означает способность электрической сети или системы сохранять заданное качество функционирования при воздействии кондуктивных ЭМП определенного уровня в отсутствие специальных ПЗС. Повышение ПУ достигается параметрическими изменениями некоторых элементов функциональных узлов СЭС для того, чтобы, помимо выполнения рабочих функций, эти элементы одновременно выполняли бы защитные функции.

Примеры источников помех, передаваемые посредством кондуктивной связи:

- токи короткого замыкания промышленной частоты в заземлителе, используемом в качестве плоскости нулевого потенциала;

- прямое попадание молнии в заземленный молниеотвод или оборудование;
- разряд статического электричества непосредственно на порт оборудования;
- перекрестные помехи между цепями, имеющими общее сопротивление;
- гармонические составляющие, колебания и провалы напряжения в цепях питания

Добиться ослабления кондуктивной связи между контурами через общее сопротивление без воздействия на источник помех можно двумя способами:

- устранение общего провода;
- уменьшение сопротивления обратного провода.

Дополнительным фактором является случайная комбинация количества и мощности судов, подключаемых к береговой сети. Например, в сложных метеорологических условиях увеличение количества подключаемых судов, при этом заранее нет данных о проектах судов, а значит и потребляемая мощность неизвестны как на этапе проектирования береговой инфраструктуры (разрабатываются новые более энерговооруженные суда, происходит закупка судов иностранного производства и т.д.) так и на этапе эксплуатации.

Исходя из указанных предпосылок проявляются следующие взаимоувязанные задачи:

1. Обеспечить высокое качество функционирования релейной защиты и автоматики, при условии перманентного изменения структуры схемы электроснабжения, количества потребителей и существенного изменения мощности каждого потребителя (далее варьирование силовой нагрузки).

2. Разработать комплекс технических мероприятий позволяющий обеспечить высокий уровень энергоэффективности и энергосбережения электропередачи «берег – судно» с учетом существенного варьирования силовой нагрузки.

3. Произвести анализ процесса формирования кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения в электропередачи «берег – судно»

4. Обеспечить снижение вероятности возникновения в указанной электропередачи кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения, в том числе при наличии концентрированных потребителей электрической энергии.

5. Сформулировать критерии момента срабатывания АВР (переход на судовой источник электрической энергии) исходя из времени провала напряжения, уровня провала напряжения, частоты повторений провала напряжения.

С учетом перехода на коммерческую основу для судовладельцев с юридической и практической точки зрения представляет интерес конкретизировать кондуктивные низкочастотные ЭМП в береговой сети, в том числе по провалу напряжения, до момента подключения. В противном случае возникает ситуация неопределенности и существенное увеличение рисков снижения срока службы или выхода из строя судового электрооборудования и средств автоматики, что влечет за собой экономические потери и судебные споры с поставщиком электрической энергии на предмет соответствия поставляемой электроэнергии нормам качества электрической энергии в системах электроснабжения ГОСТ 32144-2013. С другой стороны, поставщику электрической



энергии принципиально выгодно не только оставлять за собой хорошую деловую репутацию, но и производить корректный учет электрической энергии, что в условиях наличия кондуктивных низкочастотных ЭМП имеет свои ограничения.

При этом степень влияния на судовые потребители электрической энергии при возникновении провалов напряжения зависит от большого количества факторов.

Например:

1. Энергометацентрическое расстояние – расстояние между центром электрической нагрузки плавучего инженерного сооружения и центром питания.
2. Мощность судовых потребителей электрической энергии, работающих при стоянке судна в порту
3. Наибольшая мощность единичного судового потребителя электрической энергии.
4. График нагрузки в зависимости от типа судна, проекта и других аспектов, например: стоянка с пассажирами и стоянка без пассажиров.
5. Загрузка механизмов и электропривода. За счет снижения нагрузки на валу электропривода появляется возможность снизить влияние кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения на дополнительные потери электроэнергии и нагрев электрической машины соответственно. При этом следует учитывать, что время провала ограничивается 1 минутой, поэтому возможно появление вибрации или электромеханических ударов, воздействующих на активные части машины.
6. Частота питающего напряжения. Отдельно стоящим вопросом является учет провалов напряжения при электроснабжении судов иностранной постройки с частотой 60Гц через конвертор частоты.
7. Наличие или отсутствие систем бесперебойного питания в структуре системы электроснабжения судов с берега.
8. Наличие или отсутствие систем помехоподавления кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения.
9. Основной береговой источник электрической энергии. Так на практике в качестве береговых источников электрической энергии применяются газопоршневые электростанции, дизельные электростанции и другие. Таким образом генерируемая мощность ограничена и появление указанной помехи при подключении концентрированных потребителей имеет большую вероятность с математическим ожиданием величины уровня провала напряжения и длительности провала напряжения, предполагающих работу технологической установки в зоне неустойчивости (рисунок 1).



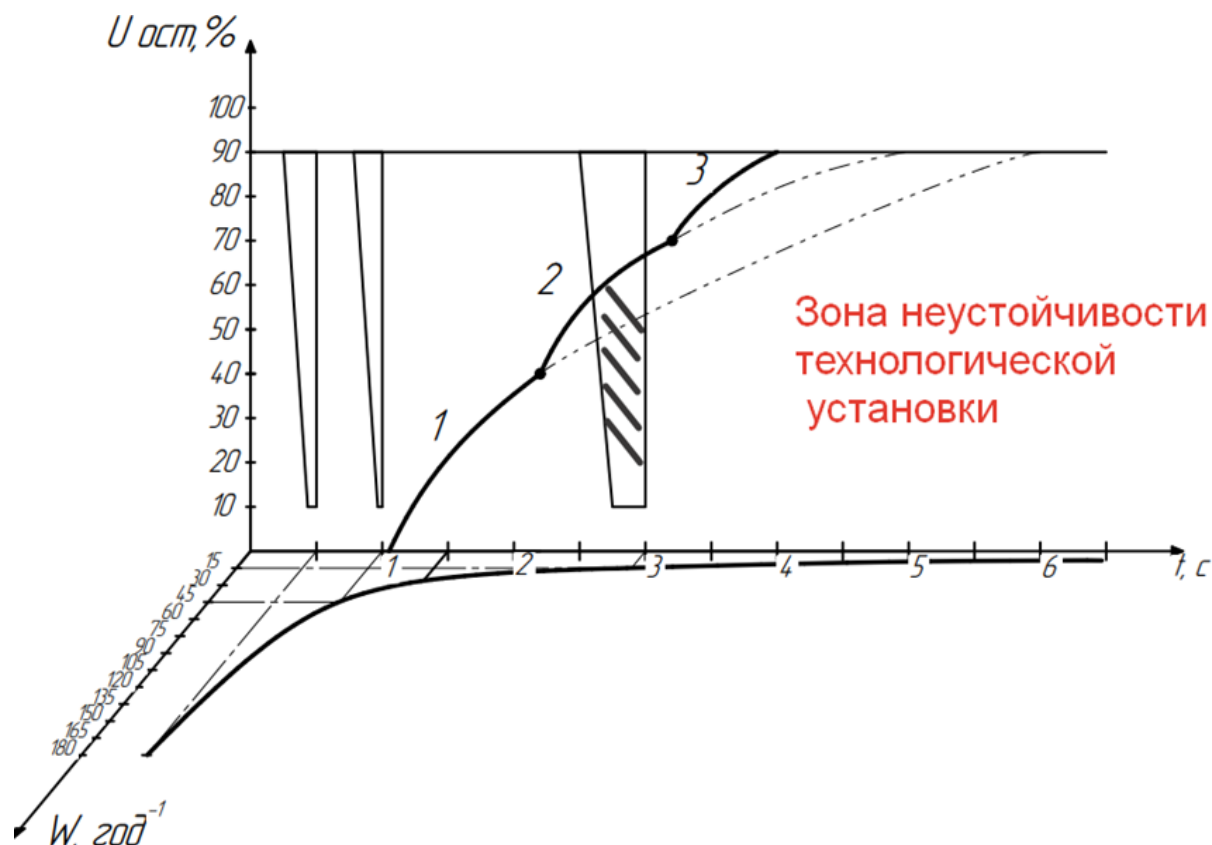


Рисунок 1– Совмещение прогноза провалов напряжения и границы устойчивости технологической установки плавучего инженерного сооружения

Так в отечественных работах [2, 3] и зарубежных работах [4] учитываются аспекты влияния кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по провалу напряжения при эксплуатации электрических машин, однако исследования учитывают общепромышленную частоту 50 Гц.

Экспериментальный метод имеет ограничения, в том числе по длительности измерений. Проводить измерения наличия кондуктивной низкочастотной ЭМП по провалу напряжения необходимо в течении года. Для прогнозирования провалов напряжения может быть использован также и расчетно-теоретический метод, требующий существенно меньших затрат материальных ресурсов и времени, в частности общая частотность появления провалов напряжения в СЭС может быть определена по выражению [5].

$$\Omega = \sum_{ik} \omega_{ik} \cdot L_{\text{пр.к}} + \sum_{jk} \omega_{jk} \cdot l_{\text{пр.к}} + \sum_{nk} \omega_{nk}, \quad (4)$$

где ω_{ik} – параметр потока КЗ к-ого вида в i -ом элементе СЭС;

$L_{\text{пр.к}}$ – предельная удаленность КЗ к-ого вида в СЭС высокого напряжения;

$l_{\text{пр.к}}$ – предельная удаленность КЗ к-ого вида в СЭС среднего напряжения.

С другой стороны, при рассмотрении сетей с учетом особенностей потребителей порта и сетей с низкими интегральными показателями. Частость появления провалов напряжения в электропередачи «берег - судно» можно определить

$$\Omega = \sum_{ik} \omega_{ik} \cdot L_{\text{пр.к}} + \sum_{jk} \omega_{jk} \cdot l_{\text{пр.к}} + \sum_{nk} \omega_{nk} + \sum_{md} \omega_{md}, \quad (5)$$

где ω_{md} – параметр потока вызывающего детерминированный провал напряжения при подключении m -го концентрированного потребителя.

Глубина провала напряжения зависит от удаленности места КЗ от центра питания, вида короткого замыкания, структуры электрических нагрузок.

$$\Delta U = k_{st} k_v k_n \frac{U_c}{l_y} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где U_c – напряжение сети (кВ);

l_y – длина участка до короткого замыкания (км);

k_{st} – коэффициент, учитывающий структуру сети (0,1 – 0,45);

k_v – коэффициент учитывающий вид короткого замыкания (0,38 – 0,43);

k_n – коэффициент, учитывающий влияние уровня напряжения на процессы протекания токов короткого замыкания (0,5 – 110 кВ; 0,7 – 10кВ).

Вывод

Рассмотренные аспекты формирования провалов напряжения позволяют прийти к следующим выводам:

1. Критерием принятия решения о подключении мобильных автономных электроэнергетических систем, например судовых, является частота появления провалов напряжения, глубина провалов напряжения и время продолжительности каждого из провалов напряжения.

2. Представлен алгоритм определения ожидаемых параметров провалов напряжения, с учётом структуры сети, наличия концентрированных потребителей, уровня напряжения.

3. Представлено совмещение прогнозов провала напряжения и границы устойчивости технологической установки плавучего инженерного сооружения, что обладает высокой практической значимостью для настройки и корректной работы релейной защиты линии электропередачи «берег – судно».

Список литературы:

1. Медведев В.В., Киселёв С.Н. Разработка и оптимизация программы для вычисления конструктивного коэффициента энергетической эффективности e_{edi} // В сборнике: Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития. Материалы международной научно-технической конференции: в 2-х частях. Ответственный за выпуск О.А. Белов. 2019. С. 23-27.
2. Сальников В.Г., Смыков Ю.Н., Барков Д.А., Васильев С.М. Сохранение устойчивости судовой электроэнергетической системы при питании судна с берега.// Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 3. С. 160-163.
3. Смыков Ю.Н. Аспекты повышения качества электрической энергии в автономных системах электроснабжения // Промышленная энергетика. 2022. № 11. С. 17-23.
4. Ström L., Bollen M., Kolessar R. Voltage Quality Regulation in Sweden. [Proceedings of the 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, 6–9 June, 2011; Paper 0168] [Electron. Resurs] <https://cired.net/publications/cired2011> (Data of appeal 10.12.2022).
5. Наумов, Олег Анатольевич. Повышение надежности функционирования электрооборудования при провалах напряжения в системах электроснабжения : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.09.03 / Моск. энергетич. ин-т. - Москва, 1998. - 19 с.

