



PS2 – S8-04



Обнаружение межсистемных качаний современными устройствами защиты

З. ЗАН¹, И. ВОЛОХ¹, Х. КАРДЕНАС², И. АНТИЗА², Ф. ИЛИЧЕТО³
GE Digital Energy Multilin^{1,2}, Rome University “La Sapienza”³
Канада¹, Испания², Италия³
Jorge.cardenas@ge.com

1 ВВЕДЕНИЕ

Явление качаний больших включенных на синхронную работу энергосистем состоит в качании фазы/частоты/мощности/напряжения/токов ротора между синхронно работающими генераторами подсистемы (или крупной электростанции) и синхронно работающими генераторами другой подсистемы (или подсистем), электрически находящихся далеко друг от друга. Режим качаний может быть глобальным, вовлекающим всю систему, или региональным. Качания могут быть вызваны крупным повреждением (потерей генератора или нагрузки; КЗ на линии) или в слабых системах могут быть вызваны очень малыми возмущениями (просто при нормальной работе).

Во второй половине прошлого века по всему миру произошли разные случаи устойчивых качаний или усиливающихся качаний пока системы защиты не разделяли вовлеченные подсистемы или не инициировали каскадное отключение линий электропередач, генераторов, трансформаторов, т.е. беспорядочный развал крупных энергосистем (частичный или полный блэкаут). В литературе это явление также упоминалось, как «межсистемные качания» или «колебательная неустойчивость».

Раннее явление качаний, которое возникло в 1960х – начале 1970х, возникало из-за применения новой системы возбуждения синхронных генераторов в частности полностью статических тиристорных возбудителей вместо вращающихся возбудителей. Использование Стабилизаторов Энергосистемы (СЭ), т.е. специальной обратной связи с автоматическими регуляторами напряжения (АРН), позволило достичь значительного демпфирования качаний. СЭ с одним входом (мощность) или двумя входами (мощность и скорость) использовались для демпфирования высокочастотных (0.8-1.5 Гц) или низкочастотных (0.25-0.8 Гц) качаний, соответственно.

Из теории стабильности угловой передачи известно, что частота межсистемных колебаний очень мала, когда емкость в МВт объединенных систем (т.е. кинетическая энергия вращающихся масс) велика и сопротивление межсистемных линий велико. Последние расширения континентальных межсистемных линий, охватывающие более нескольких тысяч км, привели к ситуации с качаниями очень низкой частоты в диапазоне от 0.1 до 0.25 Гц. Гидроэлектростанции с большим усилением в переходном режиме осуществляющие основное управление частотой, могут способствовать возбуждению или усилению этих низкочастотных качаний, увеличивая отрицательное затухание, вызванное быстро реагирующей системой возбуждения синхронных генераторов. С другой стороны, демпфирующее действие СЭ на эти низкие частоты может быть значительно уменьшено.

Пример динамической симуляции, осуществленной для синхронного подключения энергосистемы Турции (на 2010 года пиковая нагрузка ~ 34 500 МВт) с системой Западной Европы (пиковая нагрузка ~ 400 000 МВт) через энергосистемы балканских стран, которые имеют относительно большое сопротивление передачи, показал, что частота межсистемных

качаний при пиковой нагрузке равна $\sim 0.13\text{Гц}$ (период $\sim 7.5\text{ с}$) [3]. В настоящий момент система континентальной Европы ENTSO-E, включая Турцию, охватывает более $\sim 4500\text{ км}$ между Португалией на одном конце и Восточной Турцией на другом.

Межсистемные качания обычно изучаются в частотной области с анализом собственных значений (модальным анализом). Коэффициент затухания межсистемных качаний определяется следующим образом:

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}}$$

Уравнение 1

где σ и ω - это действительная и мнимая части собственных значений $[\sigma + j\omega]$ (с^{-1}). Затухание обычно считается удовлетворительным, если все режимы электромеханических качаний имеют коэффициент $\xi \geq 5\%$. Если $\xi = 5\%$, амплитуда качаний уменьшается на 33% за полных три периода.

Вычисление частоты качаний являются точными, так как они зависят от точности параметров системы. С другой стороны, предсказание коэффициента затухания могут быть далеки от истины, так как они зависят от симуляции многих функций управления и компонентов, некоторые из которых производят неопределенный демпфирующий эффект (например, нагрузка). Изменение значений и направления межсистемного перетока мощности обычно заметно влияют на затухание. Поэтому хорошим инструментом для работы системы является функция, описанная в данной статье, которая способна определять частоту (и мощность) межсистемных качаний для выдачи сигналов операторам и, в случае устойчивости или усиления качаний, инициировать автоматические корректирующие действия. Далее может быть управление статическим компенсатором реактивной мощности или STATCON, или тормозным резистором, или высоковольтной вставкой постоянного тока, регулируемое частотой колебаний. В качестве последней линии обороны, функция может инициировать разделение системы путем отключения межсистемных линий в заданных местах, в которых обнаруженные качания предвещают скорое начало каскадного отключения в сети.

2 ОБЗОР МЕТОДОВ И ОГРАНИЧЕНИЙ АНАЛИЗА МЕЖСИСТЕМНЫХ КАЧАНИЙ

Современные энергосистемы становятся сильно взаимосвязаны друг с другом с целью повышения надежности, уменьшения операционных расходов, улучшения качества электроэнергии и уменьшения необходимости во вращающемся резерве. Однако объединение энергосистем также несет некоторые технические трудности. Среди них межсистемные качания с низкой частотой стали одной из основных угроз надежности работы крупных энергосистем. Межсистемные качания не только ограничивают количество передаваемой электроэнергии, но также угрожают безопасности системы, так как могут привести к нестабильности системы и, как результат, к каскадным отключениям в системе. Поэтому необходимо определить характеристику качаний, включая их частоту и коэффициент затухания, чтобы можно было предпринять необходимые действия по увеличению затухания качаний и сохранению стабильности системы.

В основном используется два способа анализа качаний низкой частоты и определения их параметров. Один – это динамическое моделирование, а второй – основанный на измерениях.

При использовании динамической модели нелинейные дифференциальные уравнения линеаризуются в окрестностях рабочей точки, а режим качаний в энергосистеме оценивается путем анализа собственных частот. Основываясь на собственных частотах, собственных векторах и участвующих факторах, может быть точно предсказано поведение системы. В общем случае необходимо детальное воспроизведение всей объединенной системы, чтобы изучить межсистемные качания.

При способе, основанном на измерениях, оценка режима качаний с низкой частотой производится путем прямого измерения. С учетом использования в последние годы Устройств измерения векторов на основании GPS и преимуществ технологии СМНР (Система

мониторинга переходных режимов), этот метод стал преобладающим. Было разработано несколько алгоритмов для произведения оценки качаний низкой частоты с помощью СМПП.

3 АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ МЕЖСИСТЕМНЫХ КАЧАНИЙ

Алгоритм обнаружения межсистемных качаний, здесь и далее обозначаемый, как SSOD (Детектор межсистемных качаний), был реализован на современном цифровом устройстве для оценки частоты и амплитуды качаний на межсистемных линиях. В отличие от анализа собственной частоты и метода Prony, которые оценивают затухание и частоту всех возможных режимов, SSOD предназначен для оценки наиболее доминирующего режима на межсистемной линии, чтобы подавать сигнал оператору или, в качестве последней линии защиты, разделить систему при возникновении устойчивых или неустойчивых качаний. SSOD основан на измерении аналоговых величин в реальном времени, например частоты или активной мощности на межсистемной линии. Измеренные данные могут поступать из локального устройства или из удаленного устройства. Как показано на Рисунке 1, аналоговые величины, измеренные удаленными устройствами (ведомыми), передаются в местное устройство (ведущее) по протоколу МЭК 61850, где они выравниваются и консолидируются. Алгоритм SSOD работает только на ведущем устройстве, то есть ведомые устройства только собирают требуемые данные и передают их в ведущее устройство, но не запускают алгоритм обнаружения качаний.

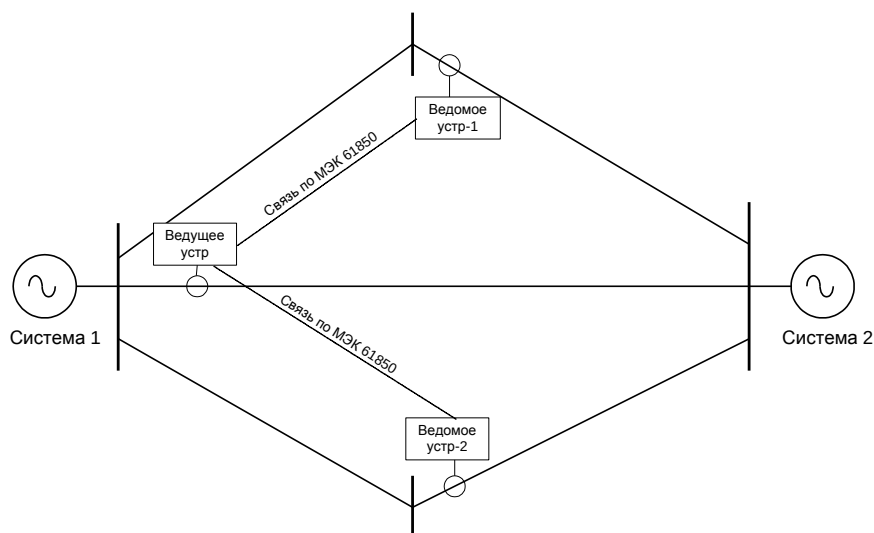


Рис. 1: Топология системы и сбора данных

Как показано на Рисунке 2, структурный алгоритм SSOD состоит из 5 частей: выравнивания и консолидации данных, проверки и фильтрации данных, определения частоты качаний, определение амплитуды качаний, решения о выдаче сигнала или команды на отключение. Они описаны ниже.



Рис. 2: Структурный алгоритм SSOD

4 ФИЛЬТРАЦИЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Фильтр низкой частоты, отсекающий частоты выше 2 Гц, применяется для сигнала $y_{ac}(n)$, чтобы удалить высокочастотные шумы. Характеристика частоты после фильтрации приведена ниже. Сигнал после фильтрации обозначается, как $u(n)$.

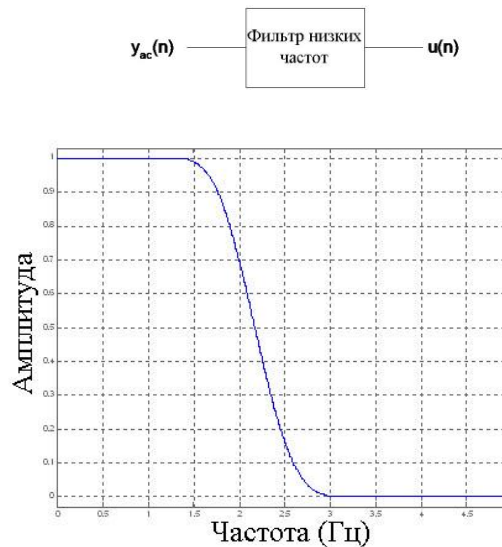


Рис. 3: Частотная характеристика Низкочастотного фильтра

4.1 Оценка частоты качаний

После того, как пройдена проверка, начинается оценка частоты. В данной реализации использовался метод оценки временного интервала широкого диапазона изменения частоты синусоидального сигнала [1]. Основная концепция данного метода описана ниже.

Синусоидальный сигнал на интервале времени может быть выражен как: $x(n) = X \cos(n\omega T + \phi)$, где T – это период дискретизации, а X – это амплитуда сигнала. Рассмотрим следующую функцию,

$$\begin{aligned} h_{k,m}(\omega) &= x(n-k)x(n-m) - x(n)x(n-k-m) \\ &= X^2 \cos((n-k)\omega T + \phi) \cos((n-m)\omega T + \phi) - X^2 \cos(n\omega T + \phi) \cos((n-k-m)\omega T + \phi) \\ &= X^2 \frac{\cos((2n-k-m)\omega T + \phi) + \cos((m-k)\omega T)}{2} - X^2 \frac{\cos(2n-k-m)\omega T + \phi + \cos((m+k)\omega T)}{2} \\ &= \frac{X^2}{2} [\cos((m-k)\omega T) - \cos((m+k)\omega T)] \\ &= X^2 \sin(m\omega T) \sin(k\omega T) \end{aligned}$$

$$\frac{h_{2k,m}(\omega)}{h_{k,m}(\omega)} = \frac{X^2 \sin(m\omega T) \sin(2k\omega T)}{X^2 \sin(m\omega T) \sin(k\omega T)} = \frac{\sin(2k\omega T)}{\sin(k\omega T)} = 2 \cos(k\omega T)$$

$$\cos(k\omega T) = \frac{1}{2} \frac{h_{2k,m}(\omega)}{h_{k,m}(\omega)} = \frac{1}{2} \frac{x(n-2k)x(n-m) - x(n)x(n-2k-m)}{x(n-k)x(n-m) - x(n)x(n-k-m)}$$

Уравнение 2

С вышеприведенным уравнением и принимая, что $m=k$, частота может быть оценена из сигнала на интервале времени $u(n)$, а также соответственно может быть вычислена средняя частота, обратите внимание на то, что $u(n)$ – это сигнал после удаления постоянной составляющей и низкочастотной фильтрации, определенной в 4.

$$f(n) = \frac{1}{2\pi k T_s} \arccos \left\{ \frac{1}{2} \frac{u(n-2k)u(n-k) - u(n)u(n-3k)}{u(n-k)u(n-k) - u(n)u(n-2k)} \right\}$$

Уравнение 3

$$f_{avg}(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} f(n-i)$$

$$N_m = \frac{f_s}{f_{avg}(n)}$$

Уравнение 4

Где N_m – это количество выборок в полном периоде качаний, а k – это количество отложенных выборок. Оба они изменяются во время работы программы. В каждом цикле работы программы, если $N < N_m$, N увеличивается на 1, а если $N > N_m$, N уменьшается на 1. Таким образом, N будет постепенно, а не внезапно приближаться к N_m , с тем, чтобы оценки были более плавными и стабильными. K задается равным максимальному значению между $N/12$ и 3.

Как показано на рисунке ниже, к алгоритму оценки частоты применяется испытательный сигнал с пошаговым изменением частоты, а затем с линейно-возрастающей частотой. Можно увидеть, что согласно оценке средняя частота f_{avg} (красная линия на нижнем графике) достаточно точно следует за реальной частотой (синяя линия на нижнем графике). Разница между этими кривыми, с точки зрения количества выборок, равна $1.25 \cdot N$, так как $f_{avg}(n)$ вычисляется с помощью N средней точки, а оценка частоты также включает $3 \cdot k$ задержки выборок. Так что суммарная задержка будет $N + 3 \cdot k = N + 3 \cdot N/12 = 1.25 \cdot N$.

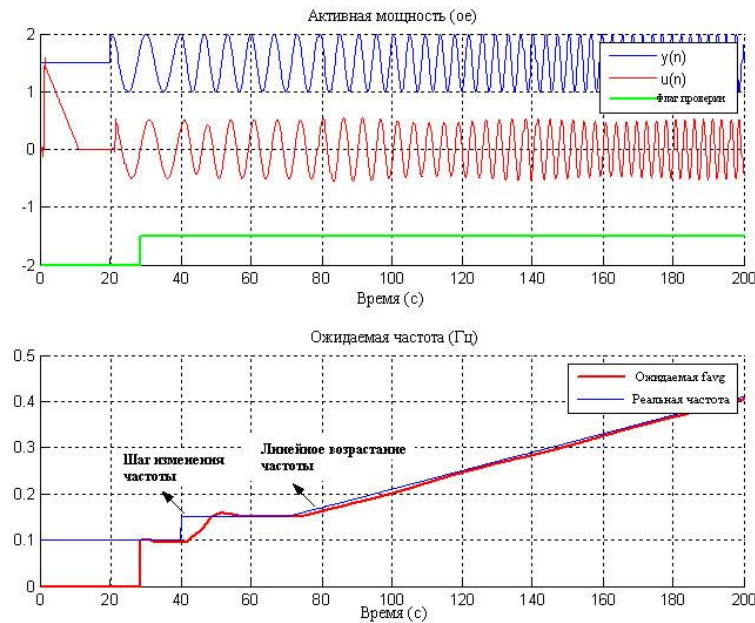


Рис. 4: Оценка частоты по ступенчатому изменению и линейно-возрастающему сигналу

4.2 Оценка амплитуды качаний

После определения частоты качаний, N (т.е. общее количество выборок за один период качаний) становится точно известно. Амплитуда качаний вычисляется, используя полное преобразование Фурье с адаптивной длиной окна, т.е. длина окна будет следовать за изменением числа N . Полный цикл вычислений N точек Фурье показан ниже:

$$C_p = \cos\left(\frac{2\pi}{N} p\right) \quad p = 0, 1, \dots, N-1$$

$$S_p = -\sin\left(\frac{2\pi}{N} p\right) \quad p = 0, 1, \dots, N-1$$

$$UC(n) = \frac{2}{N} \sum_{p=0}^{N-1} u(n+p-N+1) \cdot C_p$$

$$US(n) = \frac{2}{N} \sum_{p=0}^{N-1} u(n+p-N+1) \cdot S_p$$

$$Umag(n) = \sqrt{UC(n)^2 + US(n)^2}$$

Уравнение 5

Таким образом, оценка амплитуды качаний будет точной, пока будет точной оценка частоты. На следующем рисунке, используя преобразование Фурье с адаптивной длиной окна, были построены входной сигнал (красная кривая) и полученная амплитуда качаний (черная кривая). Видно, что полученная амплитуда очень точно следует за входным сигналом в условиях изменения его частоты и амплитуды.

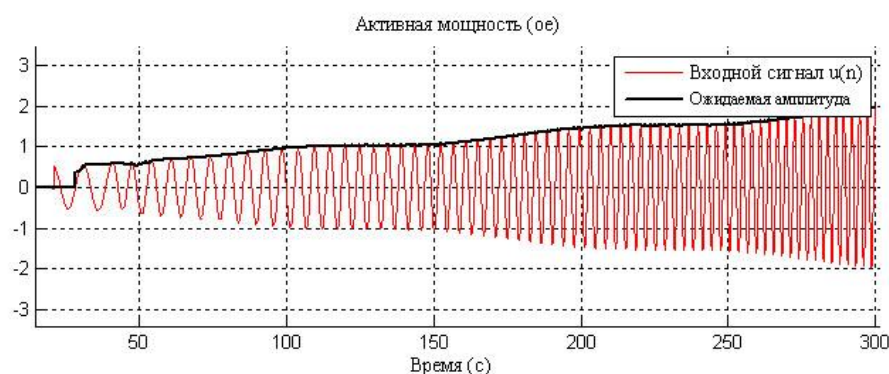


Рис. 5: Оценка амплитуды, используя преобразование Фурье с адаптивной длиной окна.

4.3 Решение о сигнале или отключении

На следующем рисунке показан элемент логики SSOD. Видно, что уровень пуска и выдержка времени на сигнал и отключение могут быть заданы независимо, чтобы соответствовать требованиям различных применений, например, уставка сигнала может быть задана более чувствительной и с меньшей выдержкой времени, чем уставка отключения. Кроме того, элемент SSOD также контролируется измеренной частотой качаний, т.е. чтобы пустился SSOD, полученная частота качаний должна быть внутри диапазона, заданного уставками Низкая частота и Высокая частота. Выход сигнала и отключения назначается, когда выполняются условия пуска и истекает соответствующая выдержка времени.

5 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Были проведены различные испытания, чтобы проверить описанный алгоритм и работу функции SSOD в устройстве. Основные функциональные испытания были проведены, используя подачи сигналов математической функции при различных условиях, включая различное число ведомых устройств, используя частоту или активную мощность в качестве входных величин для SSOD, различные уровни амплитуды и частоты качаний, различные уставки зоны нечувствительности и шумов, ступенчатый и линейно-возрастающий сигнал и т.д. Также были проведены испытания энергосистемы в реальном времени, чтобы проверить работу SSOD при различных режимах работы энергосистемы, используя RTDS (Цифровой симулятор реального времени). Кроме того были тщательно проверены связь по МЭК 61850, выравнивание и консолидация данных, потеря данных и обработка ошибок.

5.1 Основное функциональное испытание наложением сигнала математической функции

Случай 1: Проверка чувствительности при постоянной частоте качаний

Это испытание по проверке чувствительности функции SSOD. В данном испытании входной сигнал подается с маленькой амплитудой качаний (0.07 о.е. от пикового уровня

качаний частотой 0.15 Гц). Уровень пуска и на отключение и на сигнал задается равным 0.03 ое без выдержки времени. Видно, что срабатывание на сигнал и на отключение произошло одновременно, как и ожидалось. Амплитуда качаний была точно оценена элементом SSOD, что показано на следующем рисунке.

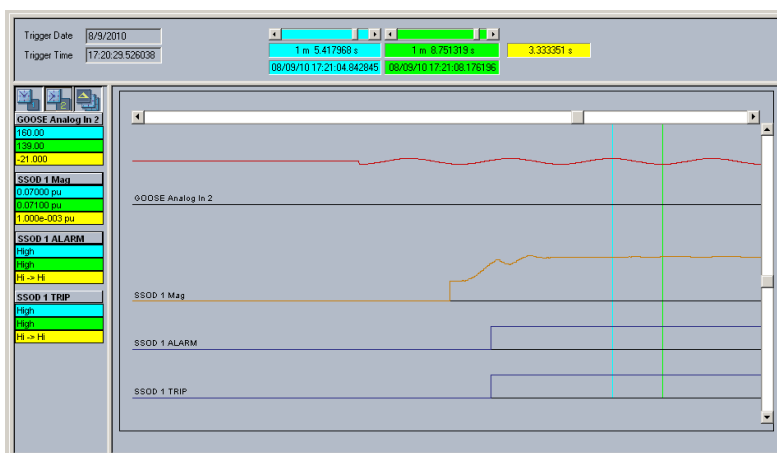


Рис. 6: Проверка чувствительности

5.2 Динамическая симуляция на модели RTDS

Двухобластная система с четырьмя генераторами, которая была задана в [2], была использована для динамических испытаний на RTDS функции SSOD. Однолинейная схема и модель системы показаны на следующих рисунках, где ГЕН 1 и ГЕН 2 находятся в первой области, а ГЕН 3 и ГЕН 4 – во второй. Четыре генератора идентичны, каждый из них имеет номинальную мощность 900 МВА и подключен к системе с помощью трансформатора на 900 МВА со схемой обмоток Треугольник/Звезда (20 кВ/230 кВ). Сопротивление линии, приведенное на однолинейной схеме, указано в о.е. с базисом 100 МВА.

Многие исследователи использовали такую модель в своем изучении межсистемных качаний с низкой частотой. Хотя система и простая, динамические характеристики межсистемных качаний и общие выводы из этой модели верны [2] и могут быть применены к большим системам.

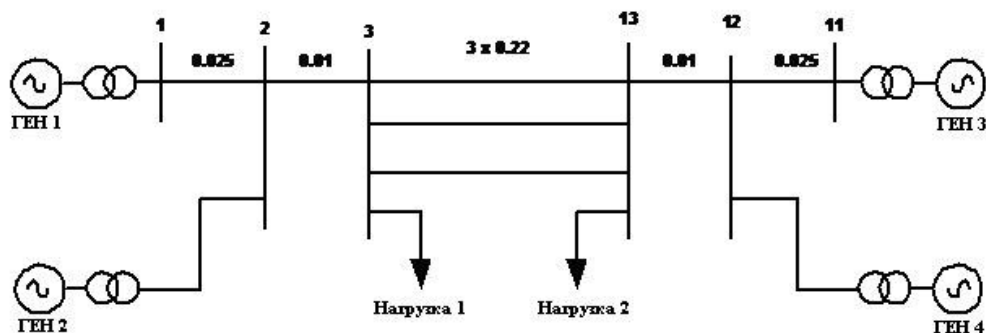


Рис. 7: Однолинейная схема системы с 4 генераторами

1. Случай 1

Описание случая:

- Количество межсистемных линий в работе: 3
- Установка PSS: только на ГЕН 1
- Область 1 и 2 имеют одинаковую генерацию и нагрузку: 1400 МВт генерации и 1367 МВт нагрузки.
- Переток мощности по межсистемным линиям: 0 МВт

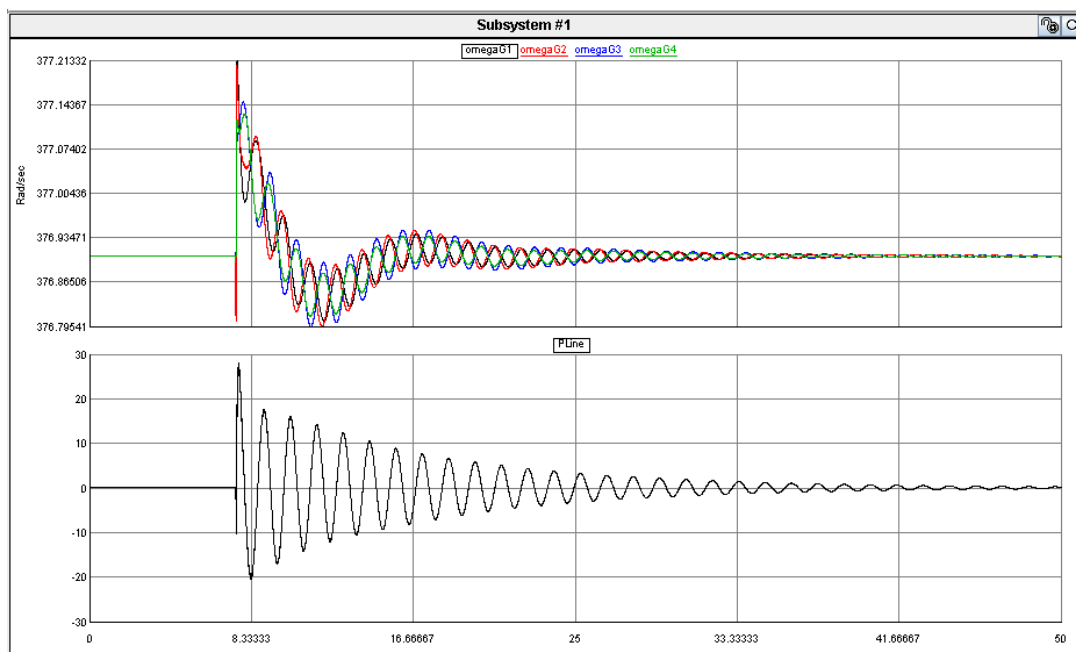


Рис. 8: График симуляции на RTDS

Видно, что имеют место стабильные качания, но с незначительным затуханием. Коэффициент затухания гораздо меньше 5% (уменьшение амплитуды на 32% через 3 периода). Здесь это заняло примерно 10 периодов, что эквивалентно коэффициенту затухания равному примерно 1.8%.

Полученная SSOD из измерений сигнала активной мощности амплитуда и частота качаний на межсистемной линии, показана ниже. Частота качаний равна 0.734 Гц. И коэффициент затухания и частота качаний согласовываются с [2]. Элементом SSOD был выдан сигнал (указывающий, что амплитуда качаний превысила 0.1 о.е. за последние 5 секунд), но сигнала на отключение не было.

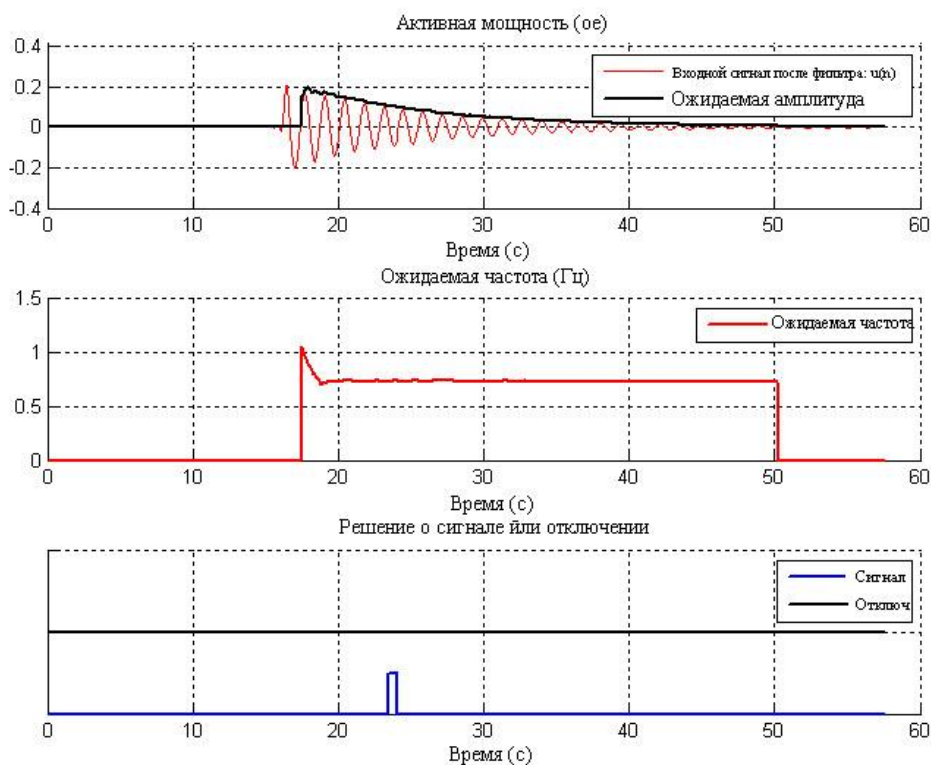


Рис. 9: Измерение и действия SSOD

6. ВЫВОДЫ

В данной статье описывается алгоритм обнаружения качаний, основанный на непосредственном измерении данных, который идентифицирует наиболее доминантный режим качаний на межсистемной линии, используя преобразования Фурье с адаптивной длиной окна и метод оценки частоты на интервале времени. При обнаружении слабозатухающих или нестабильных межсистемных качаний, выдается команда на сигнал или отключение, чтобы предупредить системного оператора, или, в качестве последней линии обороны, чтобы отключить межсистемные линии, чтобы избежать каскадных отключений в сети.

Были применены различные условия проверки, чтобы предотвратить алгоритм SSOD от срабатывания из-за шумов или других неколебательных изменений входного сигнала таких, как ступенчатое изменение или линейное возрастание. Алгоритм SSOD был реализован в современных устройствах защиты и тщательно испытан на надежность и точность в лаборатории, как путем подачи сигналов математической функции, так и с помощью модели RTDS.

Устройства с функцией SSOD, представленные в данной статье, были установлены в энергосистеме Турции, чтобы обнаруживать межсистемные качания низкой частоты (0.1-0.2 Гц) на трех 400 кВ линиях, соединяющих систему Турции с объединенной системой Европы через Болгарию и Грецию. Начальные уставки устройства SSOD были заданы равными 30 мГц-10с для сигнала и 60 мГц-50с для разделения системы.

Для дальнейшего демпфирования межсистемных качаний планируется добавить в Турции специальную схему управления 4 статическими компенсаторами реактивной мощности на ± 300 МВар каждый, которые находятся в работе на сталелитейных заводах. В случае наращивания межсистемных колебаний в диапазоне частот от 0.1 до 0.2 Гц и превышения заданной амплитуды, детекторы будут моделировать выход статического компенсатора в фазе с частотой качаний, таким образом, модулируя на несколько процентов напряжение питания дуговой печи. Результирующая пропорциональная модуляция активной мощности, потребленной печью, должно компенсировать качания перетока мощности на межсистемных линиях и демпфировать межсистемные качания.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Waldemar Rebizant, and Bartosz Rusek, "Efficient Frequency-Adaptive Amplitude Tracking Algorithms for Protection Purposes", 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, June 23th-26th, Bologna, Italy.
- [2] M. Klein, G.J. Rogers, P. Kundur, "A Fundamental Study of Inter-Area Oscillations in Power System", Transactions on Power Systems, Vol 6, No. 3, August 3, 1991.
- [3] F. Iliceto, A. Gubernali, K. Yildir and Y. Durukan, "Special Protection System in the interface between the Turkish and ENTSO-E Power Systems to counteract propagation of major disturbances", 2010 CIGRE Session, Paper C2 – 204, Paris, August 2010.
- [4] Jorge Ariel Hollman, "Step by Step Eigenvalue Analysis with EMTP Discrete Time Solutions", Ph.D Degree Thesis, Graduate Studies, the University of British Columbia, 2006.
- [5] Satnam Singh, "Application of Prony Analysis to Characterize Pulsed Corona Reactor Measurements", Master Degree Thesis, Electrical Engineering Department, University of Wyoming, 2003.
- [6] L. Rouco, "Eigenvalue-based Methods for Analysis and Control of Power System Oscillations".