

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиофизики и нелинейной динамики

**Анализ областей синхронизации в модели взаимодействующих
генераторов переменного тока**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента(ки) 4 курса 422 группы

направления 11.03.02 Инфокоммуникационные

технологии и системы связи

физического факультета

Андриенко Кирилл Сергеевич

Научный руководитель

инженер, аспирант

_____ П. А. Аринушкин

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

_____ В.С. Анищенко

Саратов 2019

ВВЕДЕНИЕ

Современный мир невозможно представить без электроэнергетических систем (далее - ЭЭС).. С каждым годом возрастает энергопотребление, внедряются новые источники электроэнергии, вследствие чего происходит развитие и усложнение энергосистем, всё это затрудняет управление системой и приводит к аварийным режимам работы.

Системные аварии последних лет показывают, что задача по исследованию методов и средств, с помощью которых можно обеспечить стабильную работу ЭЭС остается актуальной. Исследования данных вопросов продолжаются в настоящее время в ряде научно-исследовательских институтов, высших учебных заведениях и других организациях, а также в научных статьях. В научной статье под названием "Сравнительный анализ существующих моделей синхронизации электросетей" ученые Nishikawa T, Motter A.E , сравнивая различные модели энергосистемы, исследуют собственные частоты осцилляторов, а также их структуру связи. В другой статье исследуется, как топологическая схема сети влияет на способность энергосистемы противостоять сильным возмущениям. В работе авторы статьи представляют стратегию предотвращения сбоев электросетей, основанную на глобальном коллективном перераспределении нагрузок. В других статьях данная проблема рассматривается с позиции инженерно-технических задач и решает их радиотехническим путем . Отметим важную роль влияния топологии связи на устойчивость энергосети. В большинстве своем реальные энергосети не являются гомогенными, то есть имеют участки сети в которых имеется переизбыток или недостаток вырабатываемой энергии. Рассмотрение энергосетей с точки зрения сложных топологий сети является актуальной задачей.

В настоящей работе мы предлагаем рассмотреть энергосеть с точки зрения динамических систем, провести численное моделирование энергосистем и выявить факторы, влияющие на ту или иную динамику функционирования систем. Нашей целью является более детальное рассмотрение модели

эффективной энергосети при изменении выходной мощности одного из выбранного генератора. В своей работе мы рассмотрели основные режимы работы энергосети и показали, как влияет неустойчивый режим на когерентный кластер осцилляторов. . В работе мы исследуем математическую модель, которая полностью опирается на реальную сеть и ее характеристики. Представленная работа включает в себя анализ математической модели, получение экспериментальных данных в виде карты режимов и частотных характеристик генераторов.

Уравнение движения ротора генератора и принцип его работы.

Базовыми элементами в конструкции электростанций являются синхронные машины-генераторы переменного тока, которые исполняют роль источника энергии электросети. Генератор переменного тока является первым и самым главным звеном в работе электрической сети. От слаженной работы генераторов будет зависеть устойчивость всей энергосистемы, поэтому важно уделить особое внимание анализу устойчивости для бесперебойной работы электрогенераторов и обеспечить синхронизацию с остальными генераторами сети. Принцип действия генератора основан на явлении электромагнитной индукции, когда в проводнике, двигающемся в магнитном поле и пересекающем его магнитные силовые линии, индуктируется ЭДС. Принцип действия синхронного двигателя основывается на взаимном влиянии магнитных полей якоря и полюсов индуктора. Важным моментом в работе генератора является запуск, при котором его двигатель разгоняют до частоты близкой к той, с которой в зазоре вращается магнитное поле. Только после этого он переходит в синхронный режим. В данной ситуации происходит пересечение магнитных полей якоря и индуктора. Этот момент получил название входа в синхронизацию. После того, как скорость становится близкой к номинальной, в индуктор подается постоянный ток.

Схема работы двигателя будет следующей. Обмотка якоря подключается к трехфазному переменному току, а к обмотке возбуждения от постороннего источника подается постоянный ток. Вращающееся магнитное поле, созданное трехфазной обмоткой и поле, созданное обмоткой возбуждения, взаимодействуют

между собой. Это вызывает появление электромагнитного момента, приводящего ротор во вращающееся состояние.

В конечном итоге получаем искомое уравнение, известное как уравнение качания

$$\frac{2H}{\omega_0} \ddot{\delta} = P_m - P_e \quad (1)$$

которое является основным уравнением движения для генератора. Переменная P_m представляет собой чистую механическую мощность, подаваемую на ротор, тогда как P_e – электрическую мощность, которая потребляется сетью и включает в себя переменные, явно зависящие от δ и переменные состояния других генераторов и нагрузок в сети, H – коэффициент инерции, ω_0 – опорная частота, $\ddot{\delta}$ – угловое ускорение генератора.

В литературе по энергосистемам особая роль уделяется моделированию динамического поведения внутреннего магнитного потока генератора, который оказывает значительное влияние на величину P_e . Также следует учитывать нелинейную динамику регулятора, который производит контроль частоты генератора и управляет величиной напряжения возбуждающей обмотки ротора. Таким образом, величина P_e является динамической величиной, которую необходимо учитывать при моделировании энергосистем.

Физическая сеть и ее представление в виде модели эффективной сети

Модель эффективной сети

В работе используется подход, описанный в статье [1] Nishikawa T., Motter A.E. / Comparative analysis of existing models for power-grid synchronization. // New Journal of Physics. 2015. vol.17, no.1. p.015012. Суть данного подхода исследования энергосетей заключается в рассмотрении математической модели, параметры которой определяются параметрами и характеристиками физической сети. Физическая сеть состоит из множества элементов. Базовыми элементами сети являются генераторы и потребители, связанные через линию передач. Все

представленные элементы сети имеют свой набор характеристик и физических величин. Генераторы в свою очередь представлены в виде синхронного двигателя, подключенного к выходному терминалу через линию передач чисто индуктивного характера. Таким образом, физическая сеть представляет собой огромный набор данных, часть которых необходима для составления уравнений, описывающих динамику данной сети. Для математического описания сети мы используем эффективную модель сети, особенность которой состоит в сокращении общего числа дифференциальных уравнений, необходимых для описания динамической системы. Математическая модель эффективной модели энергосети выглядит следующим образом:

$$\frac{2H_i}{\omega_R} \ddot{\delta}_i + \frac{D_i}{\omega_R} \dot{\delta}_i = A_i^{EN} - \sum_{j=1, j \neq i}^{n_g} K_{ij}^{EN} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}^{EN}), \quad i = 1, \dots, n_g \quad (2)$$

$$A_i^{EN} = P_{g,i} - |E_i|^2 G_{ii}^{EN}, \quad K_{ij}^{EN} = |E_i E_j Y_{ij}^{EN}|, \quad \gamma_{ij}^{EN} = \alpha_{ij}^{EN} - \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

где $\omega_0 = \omega_R$ – опорная угловая частота для системы; H_i и D_i – константы инерции и затухания осцилляторов, соответственно; A_i – параметры собственных мощностей генераторов; Параметр K_{ij} – представляет силу динамической связи между осцилляторами i и j или максимум взаимных мощностей генератора и приемной системы, γ_{ij} характеризует фазовый сдвиг. Все представленные параметры системы приведены в безразмерном виде. В качестве нормирующей величины используется базовая мощность $P_R = 100 \text{ MV A}$. Опорной частотой системы была принята частота сети $\omega_R = 50 \text{ Гц}$ или $314,1593 \text{ рад/с}$.

Параметры правой части уравнения A_i , K_{ij} , γ_{ij} определяются с помощью физических параметров реальной энергосети. Собственная мощность генератора A_i^{EN} находится как разность выходной мощности генератора $P_{g,i}$ и произведения

ЭДС генератора на действительную часть матрицы адмиттанса сети G_{ii}^{EN} и таким образом является мощностью генератора в которой учтены активные потери энергии. K_{ij}^{EN} является динамической силой связи, которую можно интерпретировать как максимальную мощность передачи энергии между двумя элементами сети и вычислить как произведение матрицы адмиттанса Y_{ij}^{EN} и ЭДС элементов, участвующих в связи. Фазовый сдвиг γ_{ij}^{EN} является фазовым углом матрицы адмиттанса, $|Y_{ij}^{EN}|e^{j(a)}$ представленным в экспоненциальной форме и участвующим в постоянном смещении разности фаз двух элементов. Таким образом, для нахождения коэффициентов правой части уравнения необходимо составить матрицу адмиттанса Y_{ij}^{EN} физической сети и знать величины напряжения ее узлов.

Для нахождения матрицы Y_{ij}^{EN} рассмотрим линию передач, представленную в виде π -модели [16] и запишем матрицу проводимости физической сети следующим образом:

$$Y_0 = \begin{pmatrix} Y^{gg} & Y^{gl} \\ Y^{lg} & Y^{ll} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где Y^{gg} , Y^{gl} , Y^{lg} , Y^{ll} элементы адмиттанса сети, сгруппированные относительно собственных и взаимных комплексных сопротивлений линии передач между узлами сети. Дополним матрицу адмиттанса компонентами Y_d , \hat{Y}^{gg} и \hat{Y}^{ll} . Матрица Y_d включает в себя величины паразитных индуктивностей, представленных в виде диагональных элементов $(jx'_{d,1})^{-1} \dots (jx'_{d,n_g})^{-1}$

где n_g общее количество генераторов. Найдем компоненты \hat{Y}^{gg} и \hat{Y}^{ll} как $\hat{Y}^{gg} = Y^{gg} + Y^{l,i}$ и $\hat{Y}^{ll} = Y^{ll} + Y^{l,i}$ для этого рассчитаем $Y^{l,i}$ как шунтирующую проводимость, эквивалентную нагрузкам $Y^{l,i} = (P_{l,i} - j Q_{l,i}) / |V_i|^2$. Конечный вид матрицы (9) примет вид:

$$Y'_0 = \begin{pmatrix} Y_d & -Y_d & 0 \\ -Y_d & \hat{Y}^{gg} + Y_d & Y^{gl} \\ 0 & Y^{gl} & \hat{Y}^{ll} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

Далее, используя метод сокращения Крона, находим матрицу адмиттансов эффективной сети как $Y^{EN} = Y'(1 + Y_d^{-1} * Y')^{-1}$, где $Y' = \hat{Y}^{gg} - Y^{gl} * (\hat{Y}^{ll})^{-1} * Y^{lg}$. Конечная матрица представляет элементы проводимости между генераторами, таким образом с помощью преобразования Крона мы устраняем из рассмотрения динамику потребителей. Данный метод упрощения возможен при условии постоянства величины $Y^{l,i}$, то есть фиксированной мощности потребителей.

Численные результаты.

Выберем топологию исследуемой сети, представленную в следующем виде:

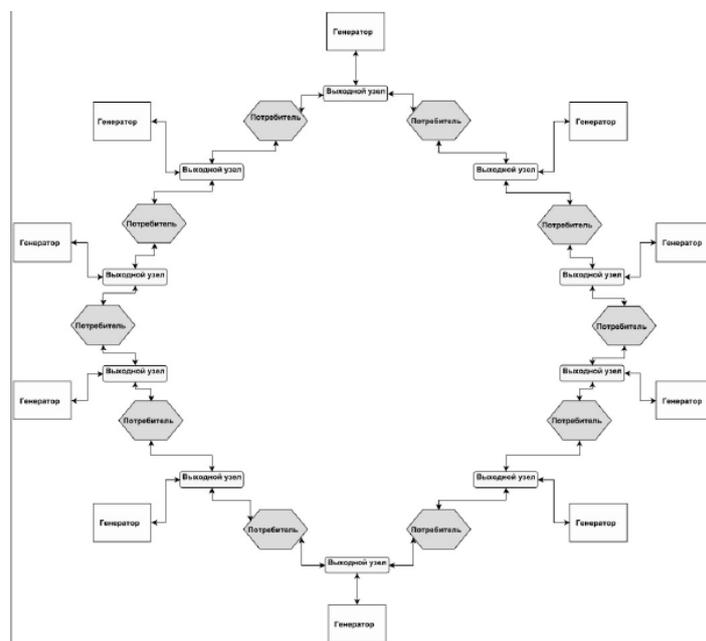


Рисунок 1. Реальная физическая сеть, представленная в виде кольцевой топологии

Построим карту режимов, рисунок 2. Активную мощность выбранных осцилляторов мы будем изменять в диапазоне от 200 до 600 MVA и наблюдать за изменением частоты, на которой происходит синхронизация всех осцилляторов.

Проведем эксперимент при изменяющихся значениях коэффициента инерции H всех генераторов от 0.5 до 10.

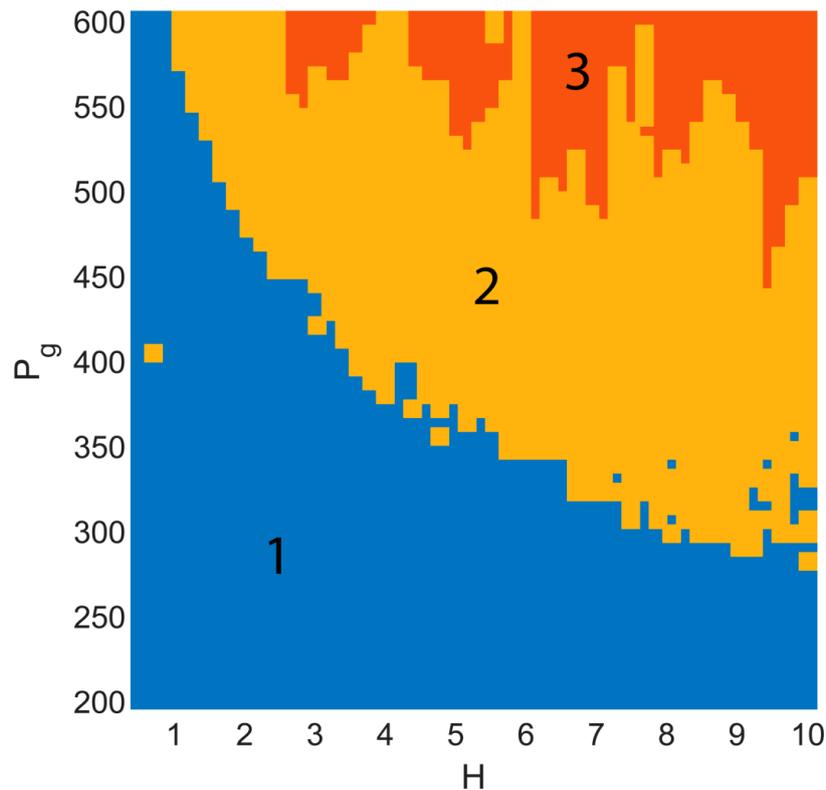
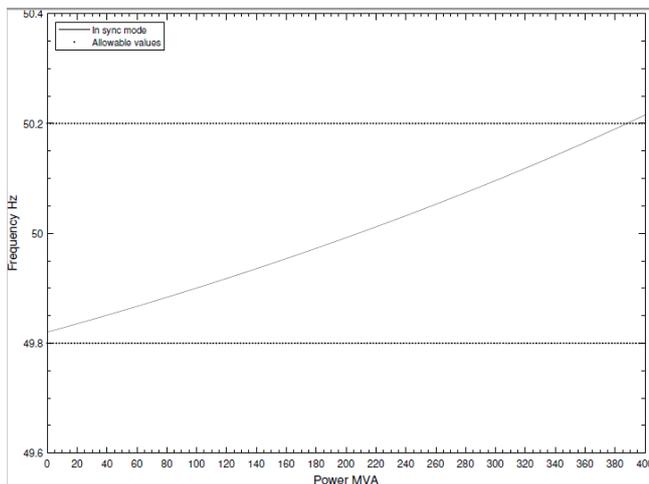


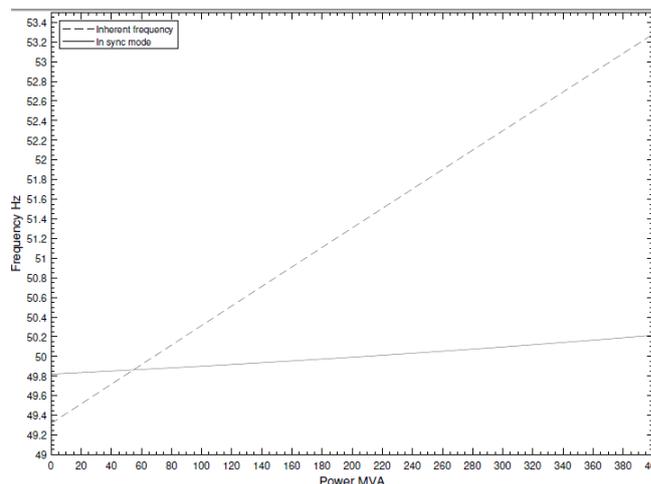
Рисунок 2. Карта режимов (зависимость выходной мощности осциллятора P_g от коэффициента инерции H)

На карте режимов мы можем увидеть 3 области : 1 область- это зона устойчивого поведения генераторов, 2 область- зона бистабильного поведения генератор, 3 область-зона неустойчивого поведения генераторов

Далее исследуем энергосеть изменяя значения коэффициента инерции H всех осцилляторов при $H= 4$. Значения частот осцилляторов, представленные на рисунке 6, были получены с помощью временных реализаций путем усреднения частоты по времени. Время интегрирования системы составляет $T=200$ при шаге $h=0.001$, для устранения влияния переходного процесса системы первые сто единиц времени интегрирования были отсеяны.



а)



б)

Рисунок 3. Зависимость частоты синхронизации от вырабатываемой мощности генератора и разных коэффициентов инерции H а) $H=4$ б) $H=10$.

Видно, что синхронная частота увеличивается с ростом выходной мощности одного из генераторов, рисунок 3(а).

В случае коэффициента инерции находящимся в диапазоне равном от 0.5 до 4, энергосеть находится в режиме полной синхронизации на протяжении всего интервала изменяемой мощности. Режим полной синхронизации энергосети характеризуется несколькими условиями: первое условие заключается в постоянстве скорости вращения ротора генератора при неизменной мощности потребления. Таким образом, переменная $\dot{\delta} = const$, вторым условием является равенство скоростей вращения роторов генераторов энергосети то есть $\dot{\delta}_1 = \dot{\delta}_2 = \dots = \dot{\delta}_i$. При малых значениях инерции энергосеть становится более устойчивой к рассинхронизации на этапах времени, связанным с переходными процессами в системе.

Вторая область-зона бистабильного поведения генератора включает себя сразу два режима поведения как устойчивый, так и неустойчивый.

На рисунке 3(б) представлена диаграмма изменения частоты синхронизации от вырабатываемой выходной мощности. В качестве изменяемого осциллятора был выбран пятый генератор реальной энергосети. Также на рисунке изображена пунктирной линией собственная частота пятого осциллятора, вычисленная по формуле $\omega_i^* = \omega R / 2\pi(1 + A_i/D_i)$. Как видно из графика собственная частота

осциллятора зависит от величины выходной мощности генератора и не всегда совпадает с частотой синхронизации осцилляторов. При увеличении мощности генератора собственная частота намного превышает частоту синхронизации. При значении выходной мощности $P_g=262,6 \text{ MVA}$ и выше происходит потеря устойчивости колебаний пятого осциллятора. Как видно из графика частота неустойчивого генератора равна его собственной частоте. При величине $P_g = 375,8 \text{ MVA}$ происходит потеря устойчивости шестого генератора, частота работы составляет 51.593 Hz тогда как собственная частота равна 51.308 Hz . При потере устойчивости одного из генераторов частота оставшегося устойчивого когерентного кластера находится на границе допустимых значений работы сети. Далее при увеличении мощности частота начинает спадать и в случае потери устойчивости еще одного генератора, начинает превышать приемлемые значения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена идеализированная энергосеть, состоящая из десяти генераторов и потребителей. Идеализация заключается в том, что элементы и соединения сети обладают идентичными физическими параметрами и величинами. Топология сети была выбрана в виде кольца, в котором генераторы и потребители чередуются между собой. Для исследования динамики энергосети мы воспользовались математической моделью эффективной сети, которая позволяет упростить рассмотрение сетей посредством устранения из рассмотрения динамику поведения потребителей, приняв их мощность за постоянную величину. Был проведен численный эксперимент, в котором производилось изменение вырабатываемой активной мощности генераторов при изменении значения величины коэффициента инерции H . Была продемонстрирована карта режимов и частотные характеристики сети, детально рассмотрены зоны устойчивого и неустойчивого поведения генераторов, а также показано влияние неустойчивого генератора на устойчивых кластер генераторов.

В этих экспериментах было выявлено, что большие значения коэффициента инерции приводят к потере устойчивости генератора на этапе установления

колебаний сети. Вышедший таким образом из синхронизма генератор приводит к возмущению частоты всех генераторов энергосети. Также было показано, что близко расположенные генераторы подвержены более сильному влиянию неустойчивого генератора, а их частоты превышают допустимые нормы работы энергосети. Высокая неоднородность мощностей генераторов в сети приводит к смещению частоты работы энергосети и таким образом может превышать допустимые частотные пределы нормального функционирования сети. В системах с малой величиной коэффициента инерции потеря полного синхронизма системы наступает при больших вариациях генерируемой мощности, таким образом, величина инерции оказывает сильное влияние на устойчивость системы. Возобновляемые источники энергии, такие как ветрогенераторы имеют малую выходную мощность, величина инерции также является намного меньшей, чем в традиционных источниках энергии, исходя из полученных экспериментальных данных, можно с уверенностью сказать, что данный вид источника энергии является наиболее стабильным и устойчивым по сравнению с остальными видами.