

В.Ф. Кириченко, В.А. Фёдорова, Г.В. Глазырин
Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УСКОРЕННОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ГЕНЕРАТОРА С МОНИТОРИНГОМ УГЛА ВКЛЮЧЕНИЯ

***Аннотация.** Выполнение процесса синхронизации осуществляется двумя традиционными способами, каждый из которых имеет свои недостатки. Для минимизации последствий разработан модернизированный метод синхронизации. Целесообразность применения модернизированного метода доказана аналитически и с применением математической модели.*

V.F. Kirichenko, V.A. Fyodorova, G.V. Glazyrin
Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russia

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ACCELERATED SYNCHRONIZATION OF THE GENERATOR WITH MONITORING OF THE ANGLE OF TURN ON

***Abstract.** The synchronization process is carried out in two traditional ways, each of which has its own significant drawbacks. To minimize the consequences, a modernized synchronization method has been developed. The feasibility of using the modernized method has been proven analytically and using a mathematical model.*

Синхронизация – комплекс действий по включению синхронных генераторов на параллельную работу с другими синхронно вращающимися генераторами электростанции или электроэнергетической системой (ЭЭС) [1].

На сегодняшний день процесс синхронизации осуществляется двумя традиционными методами: точной синхронизации (ТС) и самосинхронизации (СС), отличающимися алгоритмом выполнения.

При использовании метода ТС для корректного включения генератора на параллельную работу необходимо обеспечить равенство режимных параметров генератора и энергосистемы. То есть разница амплитуд электродвижущих сил (ЭДС), частот, фаз ЭДС (угол δ между векторами ЭДС) генератора и ЭЭС в пределе должны стремиться к нулю [2]. Основной недостаток метода ТС – длительность выполнения операции из-за необходимости соблюдения перечисленных требований.

Включение генераторов на параллельную работу методом

самосинхронизации предполагает включение генератора в сеть в невозбужденном состоянии с последующей подачей тока возбуждения в обмотку ротора. Недостаток метода заключается в возникновении уравнивающих токов большой величины, что вызывает термические и динамические воздействия на агрегат [3,4].

Для исключения недостатков двух традиционных методов принято решение по созданию некоторого промежуточного метода синхронизации. Сравнение традиционных и предлагаемого методов выполнено с использованием численного показателя – величины уравнивающего тока в соответствии с выражением (1).

$$I''_{\text{ур}} = \frac{\Delta E}{x''_d + x''_c}, \quad (1)$$

где ΔE – векторная разность напряжения ЭЭС и генератора; x''_d – индуктивное сверхпереходное сопротивление генератора; x''_c – индуктивное сверхпереходное сопротивление энергосистемы.

Для автоматизированного расчёта уравнивающего тока, возникающего в ходе синхронизации генератора различными методами, и последующего анализа полученных величин разработана математическая модель процесса синхронизации в среде MATLAB. Основная задача модели – графическая визуализация каждого метода синхронизации (в том числе и предлагаемого промежуточного метода) в виде кривых уравнивающего тока от времени (рис. 1). Математическая модель функционирует на основе решения системы дифференциальных уравнений (формула 2), описывающих процесс синхронизации с учётом электромагнитных и электромеханических явлений, имеющих место при её осуществлении. Получение различных вариантов синхронизации происходит за счёт варьирования начальных условий: момента включения (в секундах) и тока возбуждения.

$$\left\{ \begin{array}{l} J \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_C - M_{\text{синхр}} - M_p, \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega_T - \omega_C. \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где J – момент инерции ротора исследуемого генератора, M_T – момент турбины, M_C – момент сопротивления, $M_{\text{синхр}}$ – синхронный момент, M_p – реактивный момент, ω_T – частота вращения исследуемого генератора, ω_C – частота вращения эквивалентного генератора системы.

Особенность промежуточного метода заключается в расширении

диапазона угла δ от 0 до 30-40° в момент включения агрегата и дополнительном снижении тока в обмотке возбуждения до величины меньше номинального значения для холостого хода (6 А). Такое решение позволяет предотвратить появление больших уравнильных токов. После включения обмотки статора под напряжение сети, ток возбуждения увеличивается до номинального значения при холостом ходе (10 А).

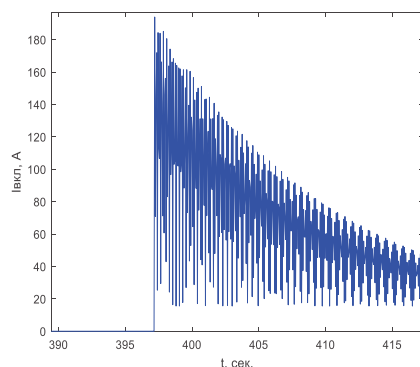


Рис. 1 - Изменение уравнильного тока во времени при использовании метода ускоренной синхронизации

Произведена экспериментальная проверка разработанного ускоренного метода, основные параметры с записанных при проверке метода осциллограмм представлены в таблице 1.

Согласно рис. 2, при использовании метода ТС максимальный уравнильный ток в момент включения достигает величины 32,82 А при включении генератора с углом $\delta = 8,15^\circ$, что почти достигает уставки, равной 10° . Время осуществления процесса составило 79 секунд.

На осциллограмме также отражена фиксация команды отключения на выходе устройства в течение 2 секунд. Задание на регулятор АРВ постоянно в течение всего времени процесса и равно 10 А. Величина скольжения в момент подачи команды на включение составляет 0,101 Гц и не превышает величины уставки, равной 0,25 Гц.

Согласно рис. 3, при использовании метода ускоренной синхронизации максимальный уравнильный ток достигает величины 45,38 А при включении генератора с углом $\delta = 32,02^\circ$, что почти достигает уставки, равной 40° . Время осуществления процесса составило 41 секунду. Задание на регулятор АРВ до подачи команды на включение составляет 6 А, после подачи – 10 А, что соответствует алгоритму действий при использовании метода ускоренной синхронизации. Величина скольжения в момент включения составляет 0,244 Гц и не превышает величину уставки, равной 0,45 Гц.

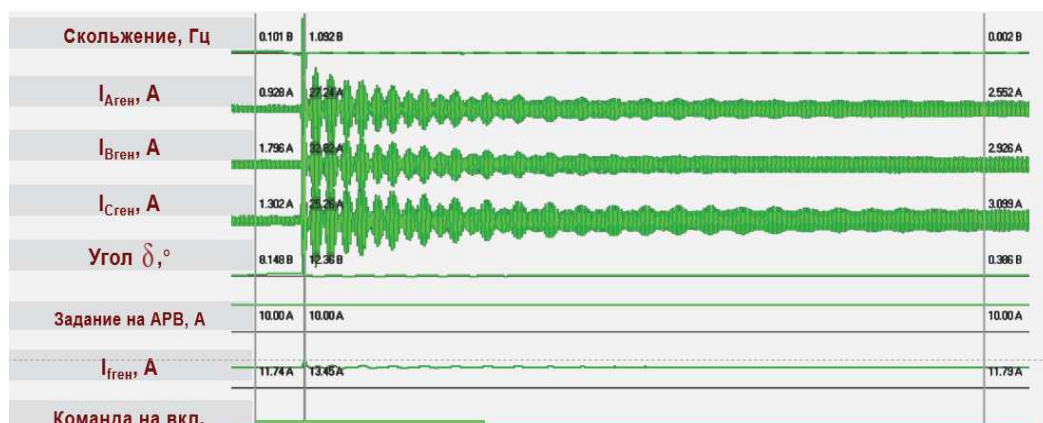


Рис. 2 - Осциллограмма метода ТС генератора мощностью 12 кВт

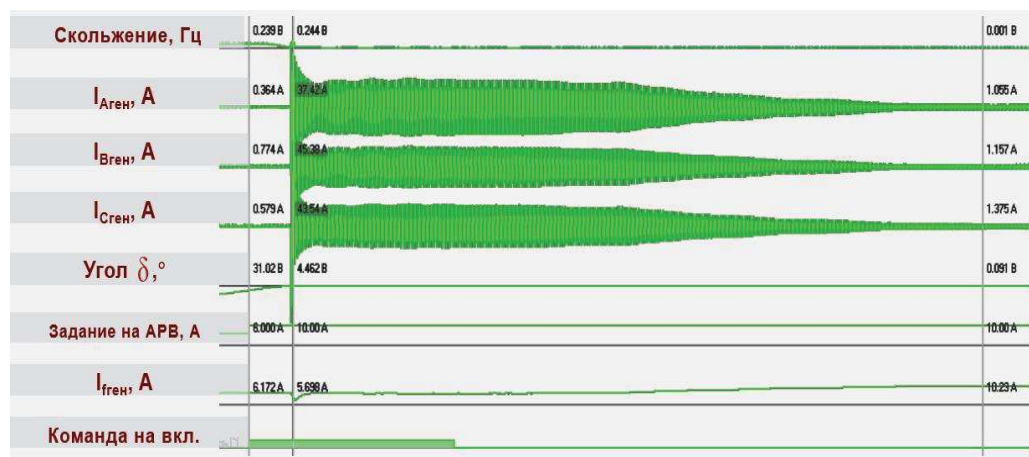


Рис. 3 - Осциллограмма метода УС генератора мощностью 12 кВт

Таблица 1 - Результаты экспериментальной проверки метода ускоренной синхронизации

Метод	$I_{ур}, А$	$t_{син}, с$	$s, Гц$	$\Delta U, В$	$\delta, ^\circ$	Среднее значение	
						$I_{ур}, А$	$t_{син}, с$
Точной синхронизации	32,82	79	0,1	4,16	8,15	21,34	82,67
	27,55	75	0,15	3,4	13,4		
	11,68	100	0,14	5,1	7,8		
Ускоренной синхронизации	45,38	41	0,24	—	32,02	41,87	39,3
	41,43	34	0,04	—	10,2		
	39,55	43	0,03	—	4,8		

Выводы по работе:

1. На основании исследования традиционных способов включения синхронных агрегатов на параллельную работу и их

основных недостатков разработан промежуточный модернизированный метод синхронизации, названный ускоренным;

2. Согласно представленной математической модели, условия, возникающие в момент включения генераторного выключателя при использовании модернизированного метода, можно рассматривать как оптимальные для аварийного включения синхронных генераторов большой мощности;

Ускоренный метод удовлетворяет следующим требованиям: выполняет процесс включения в сеть машины быстрее, чем методом точной синхронизации, но при этом имеет уравнительные токи в момент включения меньшие, чем в методе самосинхронизации.

Средняя длительность выполнения синхронизации ускоренным методом составляет 39 секунд, что в два раза ниже, чем при методе ТС, а средний уравнительный ток в момент включения – 42 А, что в 2 раза превышает величину тока при использовании метода ТС.

Список использованных источников

1. Павлов Г.М., Меркурьев Г.В. Автоматика энергосистем. – Санкт-Петербург: «Центр подготовки кадров энергетики», 2001 г. – 381 с.

2. Erdal Bekiroglu, Alper Bayrak. Automatic synchronization unit for the parallel operation of synchronous generators, IEEE EUROCON 2009 (St. – Petersburg, Russia), pp. 766 – 771.

3. Фёдорова В. А. Автоматическое устройство для включения в сеть генераторов методом ускоренной синхронизации // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. 15 Всерос. науч. конф. молодых ученых: Изд-во НГТУ, 2021. – Ч. 4. – С. 196–200. - 100 экз. - ISBN 978-5-7782-4566-2.

4. Fyodorova V. et al. Application of Automatic Device for Generator Connection to the Network by Method of Accelerated Synchronization // IEEE 23 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 30 June – 4 July 2022. - Novosibirsk : IEEE, 2022. - P. 461–466. - ISBN 978-1-6654-9804-3.