

УДК 621.316

**УВЕЛИЧЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ИНЕРЦИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ
INCREASING THE CONSTANT MECHANICAL INERTIA
OF ELECTRICAL MACHINES TO IMPROVE STABILITY**

А.А. Кот, К.В. Гайков

Научный руководитель – А.Л. Старжинский, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

A Kot, K. Haikov

Supervisor – A. Starginsky, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы увеличения инерции электрических машин разными способами и сравнения их использования.

Annotation. The article discusses the issues of increasing the inertia of electric machines in various ways and comparing their use.

Ключевые слова. инерция, постоянная механическая инерция, возобновляемые источники энергии, маховик, прямые методы увеличения постоянной механической инерции.

Keywords. inertia, constant mechanical inertia, renewable energy sources, flywheel, direct methods of increasing constant mechanical inertia.

Введение

Современная электроэнергетика переживает этап глубокой трансформации, связанный с активным внедрением возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как ветровые и солнечные электростанции. Генераторы на основе ВИЭ, подключаемые к сети через силовые преобразователи, не вносят существенного вклада в общий запас кинетической энергии системы, так как их роторы либо несинхронно, либо отсутствуют (фотоэлектрические панели). Это приводит к снижению эквивалентной постоянной инерции всей энергосистемы, что повышает скорость изменения частоты при возникновении разбаланса между генератором и нагрузкой. Снижение инерции является критическим фактором, ухудшающим динамическую и статическую устойчивость синхронных генераторов, остающихся основной энергоснабжения.

Основная часть

Одним из подходов к повышению устойчивости энергосистемы является увеличение постоянной механической инерции синхронных машин.

Инерционные свойства генератора связаны с массой и геометрией вращающихся элементов, которые определяют запас кинетической энергии. Чем выше инерция, тем медленнее изменяются скорость и угол вращения ротора под воздействием внешних факторов, что позволяет поддерживать синхронную работу, однако если инерции недостаточно, ротор выходит из синхронизации и снижает стабильность энергосистемы.

В условиях сильных возмущений, например, короткое замыкание, углы и скорости вращения генераторов быстро изменяются. Увеличение инерции

помогает смягчить реакцию машины на возмущения, уменьшить амплитуду отклонений и дать больше времени для устранения аварийной ситуации. Так же стоит учитывать, что конструктивные и экономические соображения могут ограничивать такое увеличение инерции, а даже небольшое увеличение инерции уже способствует уменьшению колебаний электрической мощности и более плавному восстановлению режима после возмущений.

Наилучший эффект может быть достигнут, если увеличение инерции сочетается с дополнительными стабилизирующими мерами такими как PSS - стабилизатор энергосистемы и SVC - статический компенсатор реактивной мощности.

PSS – это устройство, воздействующее на систему возбуждения генератора и создающее дополнительный электрический момент, направленный на подавление колебаний ротора. PSS предназначен для генерации корректирующего сигнала при изменениях скорости или частоты, включая эффект возбуждения, который активно гасит колебания. По сути, он обеспечивает электрическое демпфирование, которое помогает генератору быстрее достичь устойчивого состояния, что уменьшает амплитуду колебаний угла поворота ротора и электрической мощности, что прямо повышает динамическую устойчивость системы.

SVC представляет собой статическое устройство, предназначенное для регулирования реактивной мощности и поддержания напряжения на заданном уровне. Оно состоит из комбинации управляемых реакторов и конденсаторных элементов, которые обеспечивают быстрое изменение обмена реактивной мощностью с сетью. Быстро реагируя на изменения в режиме работы, SVC поддерживает напряжение и уменьшает отклонения в точке подключения, что снижает вероятность неустойчивости во время переходных процессов и помогает стабилизировать работу генератора.

Хотя это не влияет напрямую на кинематику ротора, поддержание напряжения и реактивного баланса значительно снижает нагрузку на систему возбуждения и повышает общую стабильность. А увеличение инерции само по себе стабилизирует систему, но нужно помнить, что его потенциал ограничен. Поэтому значительно больший эффект достигается при комбинированном использовании этих мер, они приводят к значительному снижению колебаний и увеличению способности системы оставаться в синхронном режиме после сильных возмущений.

Уравнение относительного движения ротора синхронной машины описывается, согласно второму закону Ньютона, уравнением:

$$J \cdot \alpha = \Delta M \quad (1)$$

Рассмотрим составляющие, входящие в данное уравнение.

Момент инерции вращающейся части энергоагрегата (ротора турбины, вала и ротора генератора) J определяется по формуле:

$$J = \frac{GD^2}{4}, \quad (2)$$

где GD^2 – маховый момент.

Угловое ускорение вращающейся части энергоагрегата α равно:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d(\omega_0 + \Delta\omega)}{dt}, \quad (3)$$

где ω – угловая скорость;

ω_0 – угловая синхронная скорость;

$\Delta\omega$ – изменение угловой скорости.

Небаланс моментов, действующих на вал ΔM равен:

$$\Delta M = M_T - M_{ЭМ}, \quad (4)$$

где M_T – вращающий момент, создаваемый турбиной.

$M_{ЭМ}$ – электромагнитный момент, обусловленный электрической нагрузкой генератора и отражающий взаимодействие между электромагнитными системами статора и ротора.

Небаланс моментов ΔM можно выразить через небаланс мощностей ΔP и угловую скорость ω :

$$\Delta M = \frac{\Delta P}{\omega}. \quad (5)$$

Если разделить левую и правую части уравнения (7.1) на номинальный момент $M_{ном} = S_{ном}/\omega_0$, то в системе относительных единиц после определенных преобразований и допущений (составляющей $\Delta\omega_*$ пренебрегают из-за её малой величины $\Delta\omega_* = 0,01 \dots 0,02$) получим:

$$T_j \frac{d\omega_*}{dt} = \Delta P_*, \quad (6)$$

где T_j – постоянная механической инерции вращающейся части энергоагрегата.

Величина постоянной механической инерции численно равна промежутку времени, необходимому для изменения скорости машины от нуля до синхронной при постоянном вращающемся моменте, равном номинальному.

Для приближенной оценки постоянной механической инерции турбоагрегата можно значение постоянной механической инерции ротора генератора $T_{jГ}$ увеличить в два раза

$$T_j = 2 \cdot T_{jГ}. \quad (7)$$

С учётом того, что маховый момент ротора генератора задается, как правило, в $\text{т} \cdot \text{м}^2$, скорость вращения n в оборот/мин, а номинальная мощность в МВт выражение для определения постоянной механической инерции ротора генератора $T_{jГ}$ примет вид:

$$T_{jГ} = \frac{GD^2}{4} \cdot \frac{\omega_0^2}{S_{ном}} = \frac{GD^2}{4} \cdot \frac{(2 \cdot \pi \cdot n/60)^2}{S_{ном}} = \frac{2,74 \cdot GD^2 \cdot n^2}{P_{ном}/\cos\varphi} \cdot 10^{-6}. \quad (8)$$

В некоторых программах для расчета динамической устойчивости может использоваться постоянная инерции $H = T_j/2$.

От величины постоянной механической инерции зависит скорость изменения угла и скольжения электрических машин. Чем больше постоянная инерции машины, тем медленнее изменяется ее скольжение и угол в переходном процессе (рисунок 1), а, следовательно, больше предельное время отключения короткого замыкания.

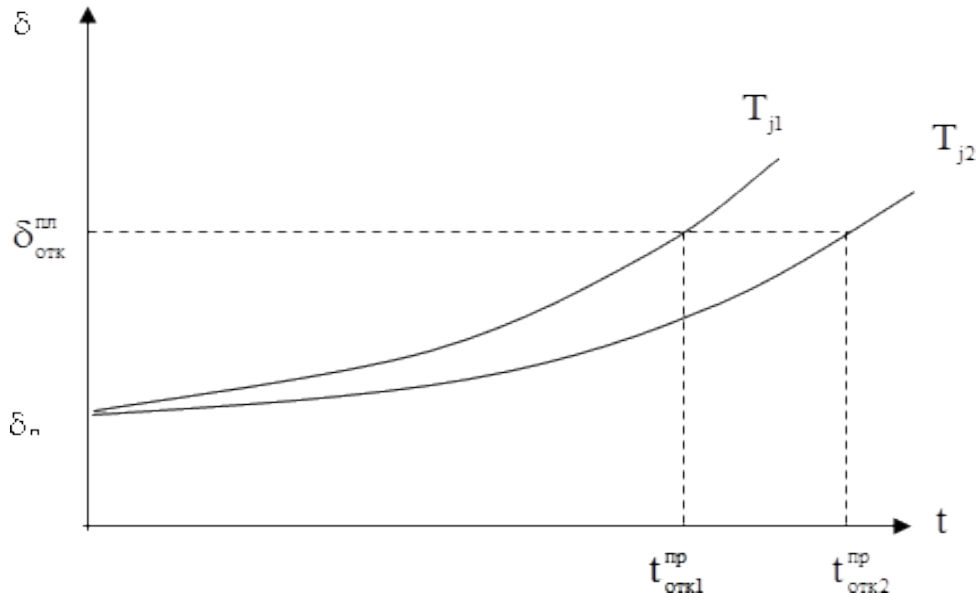


Рисунок 1 – Изменение угла δ в переходном процессе при различных постоянных механической инерции ($T_{j1} < T_{j2}$)

Дальше можно обсудить при помощи каких методов мы можем добиться увеличения постоянной механической инерции. Их всего два: прямой и косвенный методы.

Прямые методы направлены на физическое увеличение момента инерции J вращающихся частей агрегата. Момент инерции J пропорционален массе m и квадрату радиуса R .

$$J = m \cdot R^2, \quad (9)$$

Следовательно, для увеличения J можно увеличить массу ротора за счёт применения более массивных конструктивных элементов. Но это приводит к увеличению массы и стоимости машины. Также можно увеличить диаметр ротора. Этот путь более желателен, так как эффективнее: момент инерции растет пропорционально квадрату радиуса. Однако увеличение диаметра ограничено прочностными характеристиками материалов (центробежные силы) и технологиями изготовления.

Ещё одним способом увеличения постоянной механической инерции прямым способом является установка дополнительного маховика.

На одном валу с турбогенератором устанавливается отдельный маховик – массивное кольцо с большим моментом инерции. Этот способ позволяет существенно увеличить H без коренной переделки конструкции самого генератора. В преимущества входят относительно простая реализация и высокая эффективность.

В недостатки можно отнести значительное увеличение длины и массы агрегата, высокая стоимость, сложность монтажа, усложнение фундамента и систем опор.

Далее рассмотрим косвенные методы увеличения постоянной механической инерции. В условиях дефицита традиционной вращающейся инерции на первый план выходят решения на основе силовой электроники.

Виртуальная инерция – алгоритм управления преобразователем (инвертором), который имитирует поведение синхронного генератора. Когда система обнаруживает отклонения частоты $\frac{df}{dt}$, контроллер инвертора мгновенно выдает в сеть дополнительную активную мощность P_{virt} пропорциональную скорости изменения частоты:

$$P_{virt} = K_v \cdot \frac{df}{dt}. \quad (10)$$

где K_v – коэффициент виртуальной инерции (аналог постоянной инерции H).

Эта мощность берется из буферного источника энергии, которым может быть аккумуляторная батарея (АКБ) и кинетическая энергия маховика, подключенного через преобразователь.

К преимуществам относятся быстродействие, гибкость и масштабируемость. Быстродействие – отклик системы виртуальной инерции значительно быстрее, чем у традиционных генераторов. Гибкость – может быть реализована в любом месте сети, где есть управляемый преобразователь и источник энергии. Масштабируемость – мощность можно наращивать, добавляя источники энергии.

Недостатки: требует источника энергии, сложность систем управления и высокая стоимость силовой электроники.

Заключение

В заключении хочется сказать, что прямые методы увеличения постоянной механической инерции являются проверенным, но капиталоемким и имеющим физические ограничения решением, а технологии виртуальной инерции представляет собой перспективное и гибкое решение, позволяющее компенсировать дефицит инерции «по требованию».

Наиболее лучшим путем развития является гибридный подход, который сочетает все плюсы двух методов. Это позволит создать устойчивую, гибкую и надежную энергосистему будущего.

Литература

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 456 с.
2. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 2008. – 536 с.
3. Осадчий Ю.Н., Сирота И.М. Влияние виртуальной инерции на устойчивость энергосистем с высокой долей ВИЭ // Электричество. – 2021. – № 5. – С. 12-20.