

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ САМОВОЗБУЖДАЮЩИХСЯ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

ANALYSIS OF INVESTIGATION RESULTS OF SELF-EXCITABLE ASYNCHRONOUS GENERATORS

Докторант Рикрикадзе А., научный сотрудник Шермазанашвили А., инженер Рикрикадзе Ш., инженер Суладзе А.
(Институт механики машин им.Р.Двали, Тбилиси, Грузия)
E-mail: arkadirik@yahoo.com, argut1@gmail.com

Резюме /Abstract: There are considered investigation results of self-excitable one and two winding asynchronous generators. Their comparative and theoretical analysis was carried out. Two formulas were obtained, giving possibility to define the current value in the working winding at well-known

current in exciting winding of the generator, when the capacitor battery is switched off

KEYWORDS: GENERATOR, ASYNCHRONOUS, SELF-EXCITATION, CONDENSER

1. Введение

В конце XX века интенсивно происходил процесс изучения вопросов самовозбуждения асинхронных генераторов, что способствовало в этом направлении решению проблемных вопросов. В результате ареал использования асинхронных генераторов (АГ) расширился, в первую очередь в авиации, в строительстве, пищевой промышленности и т.д. Их применение как автономного источника напряжения стало особенно целесообразным на повышенных частотах (200, 400 и 600 Гц).

К этому периоду усовершенствовалась так называемая двух обмоточная электрическая схема самовозбуждения, что способствовало созданию компактной конструкции. В то же время стало возможным их использование в АГ практически на любых низких напряжениях, что было невозможно в одно обмоточных АГ. Что касается потребности в низком напряжении, она обусловлена электробезопасностью электро-механических устройств. В существующих двух обмоточных АГ одна обмотка используется для возбуждений, вторая является «рабочей» обмоткой, к которой приложена нагрузка. Эти две обмотки между собой имеют только магнитную (трансформаторную) связь. Обмотка возбуждения рассчитана относительно на высокое напряжение (≥ 380 В), а рабочая обмотка на номинальное напряжение (≤ 380 В). Это способствует уменьшению величины суммарной емкости конденсаторной батареи, массы и габаритных размеров. Реактивная мощность конденсатора $(1) Q = \omega C U^2$,

где ω – угловая частота, C – емкость конденсаторной батареи, U – величина линейного напряжения. Из формулы (1) видно, что при одинаковой величине реактивной мощности, чем больше величина напряжения на обмотке возбуждения, тем меньше величина емкости конденсаторной батареи.

2. Предпосылки и средства для решения проблемы

В теории электрических машин известна формула

$$(2) f_r = \frac{p \cdot n}{60},$$

где p – число пар полюсов АГ, n – частота вращения ротора (об/мин), а f_p – электрическая частота вращения ротора. При холостом ходе АГ скольжение ротора $S \approx 0$ и в этом случае $f = f_r$ т.е. получаем выражение

$$(3) f_r = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

Если известно количество пар полюсов АГ и частота вращения ротора, также величина собственной индуктивности статора, из формулы (3) можно определить необходимую величину

емкости, при подключении которой к обмотке возбуждения статора получим генерацию желаемой нами частоты тока. АГ представляет собой источник активной мощности. Намагничивающий ток он получает от конденсаторов, реактивная мощность которого должна быть достаточной как для получения реактивной намагничивающей мощности так и для компенсации нагрузки АГ.

Генерируемая частота тока АГ при постоянной частоте вращения ротора изменяется, так как она зависит от нагрузки. При холостом ходе, когда угловая частота вращения ротора ($\omega = \text{constant}$) постоянная величина а емкость конденсаторной батареи изменяется ($C = \text{Var}$), или наоборот, когда $\omega = \text{Var}$, а $C = \text{constant}$, при этом в первом варианте имеем одну намагничивающую характеристику АГ, соответствующую заданной частоте вращения и вольт-амперные характеристики возбуждающей конденсаторной батареи, при этом каждая характеристика по положительному направлению оси абсцисс составляет угол $(4) \alpha_k = \arctg \frac{1}{\omega \cdot C_k}$,

где $k=1, 2, 3 \dots$ а произведение $L_k \cdot C_k = \text{const}$, так как из-за нелинейности намагничивающей кривой индуктивность претерпевает соответствующее изменение. Например, с увеличением емкости ток холостого хода и степень насыщения магнитной цепи увеличивается, а индуктивность уменьшается. Величина установившегося напряжения определяются точкой пересечения кривой намагничивания и вольт-амперной характеристикой конденсаторной батареи, а во втором варианте т.е. при переходе на новую установившуюся частоту вращения, когда $C = \text{constant}$, имеем семью намагничивающих кривых и семью вольт-амперной характеристики возбуждающих емкостей. Угловой наклон последних по положительному направлению оси абсцисс теперь определяется соотношением $(5) \alpha_k = \arctg \frac{1}{\omega_k C}$

Установившиеся значения напряжения в каждом отдельном случае определяются при данной угловой частоте ω_k точкой пересечения вольт-амперных характеристик конденсаторных батарей и кривой намагничивания.

При нагрузке асинхронного генератора, когда $C = \text{constant}$, и $f_r = \text{constant}$, получим тождество

$$(6) \frac{\omega_r}{1-S} = \frac{\omega}{p},$$

где $(7) \omega_r = \frac{2\pi f_r}{p}$ – угловая частота вращения ротора, а

S – скольжение ротора. Так как $(8) \omega = 2\pi f$

где f – частота генерируемых колебаний, подставляя (7) и (8) в (6), получим $(9) f = \frac{f_r}{(1-S)}$ случае увеличении нагрузки, при

$\omega_r = \text{constant}$, частота генерируемых колебаний несколько уменьшится, так как в устойчивом участке механической характеристики АГ скольжение ротора пропорционально нагрузке. С другой стороны, уменьшение частоты f , когда $C = \text{constant}$, можно объяснить увеличением индуктивности фазы статора (увеличением коэффициента взаимной индуктивности). Последнее вызвано размагничивающим действием тока ротора. Постепенным увеличением генерируемого напряжения АГ реактивное сопротивление взаимной индуктивности X_m уменьшается в связи с насыщением магнитной цепи.

Возбуждение АГ возможно, если потери, обусловленные реактивным намагничивающим током, компенсируются за счет энергии, приходящей со стороны ротора. Переходной процесс возбуждения характеризуется неравенством $(X + X_m) \cdot \omega > \omega_r \cdot C$,

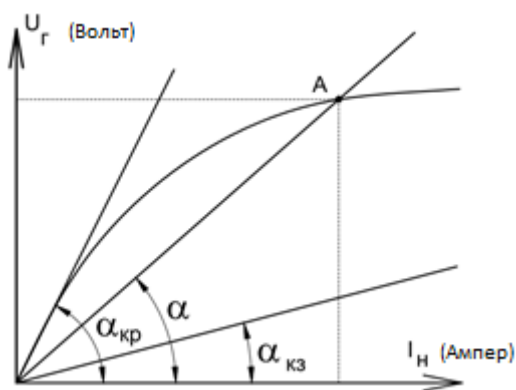
где X – индуктивность обмотки статора. Точка пересечения этих характеристик соответствует установившемуся режиму, для которого справедливо равенство $\omega(L + L_m) = \frac{1}{\omega C}$.

где $L + L_m = L_r$,

L_r – индуктивность асинхронного генератора.

На Фиг.1 показана вольтамперная характеристика конденсатора и кривая намагничивания АГ, которые пересекаются в точке А. Точкой А определяется момент возбуждения АГ, где U – величина напряжения, а I_n – ток намагничивания. Когда $X = \text{const}$, касательная u кривой намагничивания представляет вольтамперную характеристику при холостом ходе. Он с осью абсцисс образует критический угол $\alpha_k = \arctg X$. Второе предельное значение магнитной характеристики выражается характеристикой короткого замыкания, оно у оси абсцисс составит угол $\alpha_{кз} = \arctg X^1$ (когда $X^1 = \text{const}$).

В случае, если $\alpha_k > \alpha > \alpha_{кз}$ происходит самовозбуждение, т.е. $X > X_C > X^1$. Когда ротор вращается и конденсаторная батарея потом подключается к обмотке возбуждения, самовозбуждение происходит быстрее, чем когда она изначально присоединена к обмотке возбуждения. Потеря возбуждения АГ происходит действием тока размагничивания вторичного контура, в частности, уменьшением электродвижущей силы, что вызывает уменьшение тока холостого хода (т.е. насыщение магнитной цепи), а в дальнейшем увеличение индуктивности генератора – L_r . Последнее уменьшает частоту генерируемых колебаний.



Фиг.1 Возбуждение АГ в точке А

АГ по сравнению с синхронными генераторами имеют улучшенную форму выходного напряжения, которое более синусоидальное при одинаковых нагрузках. Помимо этого, его включение в параллельном режиме гораздо легче при больших различиях угловых частот вращения роторов.

3. Решение рассматриваемой проблемы

Для изучения проблемных вопросов возбуждения АГ нами изготовлены и исследованы трехфазные и двухфазные АГ. С этой целью запроектированы и изготовлены АГ с короткозамкнутым ротором мощностью 0.37кВт, 0.75кВт и 1кВт как промышленной частоты 50Гц, так и повышенной частоты 200Гц и 600Гц на напряжение 380в, 36в и 220в соответственно. Вышеуказанные АГ были изготовлены на базе существующих асинхронных электродвигателей серии 4А71В2, 4АА64В4 и 4А80В6. Изготовлены как по одно обмоточной, так и по двух обмоточной схеме, они были рассчитаны как на 3000об/мин, так и на 6000об/мин. При двух обмоточной схеме обмотки были уложены в одних и тех же пазах. Между ними имеется только трансформаторная связь. Исследование проводилось на двух, четырех и двенадцати полюсных АГ. Целью исследования было выяснение следующих вопросов:

1. Какое влияние имеет количество полюсов на возбуждаемость.
2. Сравнение одно и двух обмоточной схемы возбуждения.
3. Влияние генерируемой частоты на процесс возбуждения.
4. Влияние насыщения магнитной цепи генератора в зависимости к получаемой мощности.
5. Также роль обмотки возбуждения и рабочей обмотки на генерируемую мощность.

Исследования проводились как в условиях холостого хода, так и при нагрузке. Нагрузкой АГ явились электро-механические инструменты разной мощности, в частности, электрический рубанок, штукатурно-затирачная машина, стригальная машинка овец, распылитель жидкости (т.е. активно -индуктивные нагрузки). Для регулирования частоты вращения АГ был использован высокоскоростной коллекторный электродвигатель переменного тока мощностью 1.5кВт производства бывшего завода электроинструментов "REBIR" (Латвия).

4. Результаты и дискуссия

В результате проведенных исследований установлено следующее:

1. Использование одно обмоточной схемы возбуждения при низких напряжениях ниже 50в практически не имеет смысла, так как масса конденсаторных батарей получается больше массы самого АГ. Проектирование АГ одно обмоточной схемой возбуждения целесообразно при напряжениях ≥ 110 в.
2. Двух обмоточная схема возбуждения АГ дает возможность получения практически любых величин низкого напряжения, тем более, если АГ повышенной частоты, так как с увеличением частоты прямо пропорционально уменьшается величина емкости конденсаторной батареи.
3. Если присоединяющие провода конденсаторной батареи к АГ имеют длину более 1м, это должно быть учтено, так как чем больше длина вышеуказанной пары проводов, тем меньше величина емкости конденсаторной батареи необходима для возбуждения, так как указанная пара проводов при повышенных частотах выполняет функцию емкости конденсатора.
4. Количество витков обмотки возбуждения и коэффициент трансформации между обмоткой возбуждения и рабочей обмоткой не влияет на жесткость внешней характеристики АГ и на его максимальную мощность (в том случае, когда конденсаторная батарея подключена только к обмотке возбуждения).
5. Изменение количества витков рабочей обмотки существенно влияет как на максимальную мощность АГ, так и на жесткость

внешней характеристики. Физический механизм последнего объясняется степенью насыщения магнитной цепи АГ.

6. Методы повышения степени насыщения магнитной цепи возможны следующим образом: уменьшением числа витков рабочей обмотки, изменением геометрических размеров магнитного провода (применением геометрии многополюсного магнитного провода статора), заменой короткозамкнутого алюминиевого провода материалом медного провода (низким удельным сопротивлением), что одновременно способствует меньшей величине скольжения ротора.

7. У самовозбуждающихся АГ обмотка возбуждения находится на статоре, что упрощает его конструкцию и упрощает балансировку ротора. Также дает возможность увеличить круговую частоту вращения, что очень важно.

8. Уменьшением коэффициента трансформации увеличивается степень размагничивания магнитной цепи (когда конденсаторная батарея присоединена только к обмотке возбуждения), так как увеличивается величина размагничивающей составляющей тока нагрузки (I_p/K_r), где I_p – ток нагрузки рабочей обмотки.

9. В существующих двух обмоточных АГ магнитная цепь сильно насыщена, что вызывает перегрев АГ.

10. Чем больше частота вращения и частота тока АГ, тем легче происходит самовозбуждение АГ.

Нами разработанная новая схема двух обмоточного АГ не только упрощает его расчеты, но и его технические параметры относительно оптимальны и в нем предусмотрена также стабилизация номинального напряжения. При проектировании АГ должно выполняться следующее условие:

А) В одних и тех же пазах статора АГ укладывается рабочая и обмотка возбуждения между которыми имеется трансформаторная связь.

Б) Сечения рабочей и обмотки возбуждения должны занимать одинаковый объем в пазах.

В) Число витков рабочей обмотки должно быть рассчитано на величину номинального напряжения, а количество витков обмотки возбуждения должно соответствовать коэффициенту трансформации.

Г) Желательно, чтобы пуск АГ произошел при холостом ходе, а при номинальной нагрузке в его рабочую обмотку должна быть введена конденсаторная батарея соответствующей величины, реактивная мощность которой при нагрузке (в общем случае активно-индуктивная) должна компенсировать мощность нагрузки.

До сегодняшнего дня двух обмоточные схемы АГ в режиме холостого хода в магнитном отношении более нагружены, поэтому их включение в этом режиме продолжительно недопустимо. Предложенный нами способ возбуждения дает возможность работы АГ без перегрева, так как при подключении нагрузки одновременно с ним происходит подключение конденсаторных батарей соответствующей величины к рабочей обмотке.

5. Заключение

На основании исследований двух обмоточных АГ двухфазного и трехфазного тока и полученных результатов можно сделать следующие выводы:

Увеличение емкости конденсаторных батарей в обмотке возбуждения не приводит в рабочей обмотке к изменению тока, что объясняется отсутствием электрической связи между этими обмотками.

Во время холостого хода с выведением конденсаторных батарей из цепи рабочей обмотки, ток проходящий в цепи обмотки возбуждения увеличивается на 10%.

Введением емкости в цепи рабочей обмотки (когда в цепи обмотки возбуждения введена соответствующая величина емкости конденсаторных батарей) мощность АГ значительно увеличивается, что объясняется насыщением магнитной цепи АГ.

На основании проведенных исследований получены две эмпирические формулы (10) и (11), которые дают возможность определить величину тока в рабочей обмотке, по значению тока возбуждения, и наоборот, по величине тока рабочей обмотки определить необходимый ток возбуждения. Вышеупомянутые формулы справедливы как в режиме холостого хода, так и в режиме нагрузки. (10) $I_p = \left(\frac{C_p}{C_b}\right) \cdot \left(\frac{I_b}{K_r}\right)$, когда $C_p \neq 0$; (11) $I_p = \left(\frac{U_{в.х}}{U_{в.н}}\right) \cdot \left(\frac{I_b}{K_r}\right)$, когда $C_p = 0$, где I_p и I_b – токи в рабочей и в обмотке возбуждения, а C_p и C_b – емкости введенные в рабочую и обмотку возбуждения. $U_{в.х}$ и $U_{в.н}$ – генерируемые напряжения в обмотке возбуждения при холостом ходе и при нагрузке. При чисто активной нагрузке мощность конденсаторов равна намагничивающей реактивной мощности генератора. Если нагрузка активно-индуктивная, тогда мощность конденсаторных батарей необходимо увеличить, чтобы она покрывала мощность реактивной нагрузки.

Применение самовозбуждающихся АГ возможно и целесообразно для получения однофазного, двухфазного и трехфазного тока в режиме источника автономной энергии в частности гибридных автомобилях, электромобилях, тракторах, особенно для питания двухфазных асинхронных мотор-колес, так как значительно упрощается их принципиальная электрическая схема управления относительно трехфазного. Увеличивается надежность, уменьшается время обслуживания и себестоимость электропривода.

Подтверждение

Эта работа была поддержана Национальным научным фондом имени Шота Руставели, грант № AR / 136/3-160/13.

ЛИТЕРАТУРА

1. Торопцев Н.Д. Авиационные асинхронные генераторы, 1970г.
2. Рикрикадзе А. Шермазанашвили А, «Универсальные бензо-электрогенераторы» журнал «Наука и технологии», 2013г; г. Тбилиси. (на грузинском языке)