Соболь А.Н., Андреева А.А.

Анализ неисправностей автономных асинхронных генераторов гибридных ветро-солнечных электростанций

ФГБОУ ВО Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т.

Трубилина

(Россия, Краснодар)

doi: 10.18411/lj-11-2020-80

idsp: ljjournal-11-2020-80

Аннотация

Доказано, что гибридные системы электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии являются экономически обоснованным решением проблемы электрификации в сельской местности и в других районах, где точка подключения к сети централизованного электроснабжения находится далеко, или есть существующее подключение к сетям ненадёжно. На данный момент существует проблема эксплуатации таких систем, связанная с возможными неисправностями автономных асинхронных генераторов ветроустановки. Получение аналитической зависимости величин токов поврежденного асинхронного генератора от расположения точки короткого замыкания внутри обмотки статора связано с учетом большого количества влияющих факторов и затруднено нелинейностью некоторых характеристик. Применение методов теории планирования эксперимента дает возможность получить алгебраические выражения в форме, максимально приспособленной для решения такой задачи.

Ключевые слова: электроснабжение, гибридная электростанция, теория планирования эксперимента, витковые замыкания в обмотке статора, автономный асинхронный генератор.

Abstract

It has been proven that hybrid power supply systems using renewable energy sources are an economically viable solution to the electrification problem in rural areas and in other areas where the point of connection to the centralized power supply network is far away, or there is an unreliable connection to the networks. At the moment, there is a problem with the operation of such systems associated with possible malfunctions of autonomous asynchronous wind turbine generators. Obtaining an analytical dependence of the values of the currents of a damaged asynchronous generator on the location of the short circuit point inside the stator winding is associated with a large number of influencing factors and is complicated by the nonlinearity of some characteristics. The use of methods of the theory of planning experiments makes it possible to obtain algebraic expressions in a form that is maximally adapted for solving such a problem.

Keywords: power supply, hybrid power plant, theory of experiment planning, turn circuits in the stator winding, autonomous asynchronous generator.

Гибридные энергетические системы сочетают в себе две или более технологий получения и хранения энергии, они предлагают множество преимуществ по сравнению с системами на одном источнике.

Известно, что выработка на солнечных и ветровых станциях зависит от внешних метеоусловий и не отличается стабильностью. В большинстве районов приход солнечной радиации и наличие ветра находятся в противофазе (т.е. когда светит яркое солнце, обычно нет ветра, а если дует сильный ветер, то солнца нет). Поэтому для обеспечения бесперебойного электроснабжения автономного объекта, уменьшения необходимой мощности ветротурбины и солнечной батареи и емкости аккумуляторной

батарей, улучшения режимов работы станции во многих случаях целесообразно использование гибридной ветросолнечной электростанции.

Как указано в [2], по сей день все еще актуальным остается вопрос использования автономных асинхронных генераторов (ААГ) с емкостным возбуждением в ветроэлектрических установках.

У асинхронных генераторов есть несколько преимуществ перед синхронными:

- 1) Простота конструкции;
- 2) Надёжность;
- 3) Высокий КПД.

И недостатки:

- 1) Не выдерживает перегрузки;
- 2) Сложно регулировать выходное напряжение.

Ветрогенераторы используют либо для зарядки аккумуляторов, либо как не единственные в системе, т.е. перегрузок в системе с ветрогенераторами быть не должно, поэтому и используются простые, эффективные и надёжные асинхронные генераторы. В других системах часто нет буферов (аккумуляторов) поэтому вероятность возникновения перегрузок достаточно высока, что и не даёт использовать асинхронные генераторы.

Асинхронные генераторы также подвержены различным техническим неисправностям. Известно, что в большинстве случаев (85-95 %) отказы асинхронных машин происходят из-за повреждения статорной обмотки. При этом более 90 % повреждений приходится на межвитковые замыкания (КЗ) [2]. Замыкание небольшого количества витков статорной обмотки ААГ не может существенно изменять основной магнитный поток машины, и, поэтому велика вероятность длительной работы ААГ с таким видом повреждения [3]. Скрытый отказ, существующий в виде виткового замыкания, значительно снижает надёжность автономного ААГ, как источника питания [3].

В создании устройств защиты (УЗ) главная трудность заключается в том, что пока мало исследованы процессы при внутренних КЗ в обмотке статора ААГ и не определены информативные параметры или признаки, характеризующие соответствующие повреждения.

Получение аналитической зависимости величин токов поврежденного асинхронного генератора от расположения точки КЗ внутри обмотки статора связано с учетом большого количества влияющих факторов и затруднено нелинейностью некоторых характеристик. Однако применение методов теории планирования эксперимента дает возможность получить алгебраические выражения в форме, максимально приспособленной для решения такой задачи [2].

Для эксперимента была подготовлена установка с ААГ, выполненная на базе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором типа 4А100S4У3 (3 кВт, 1435 об/мин). [2] Генератор приводился во вращение двигателем постоянного тока (привод ААГ с мягкой механической характеристикой) или асинхронным двигателем (привод ААГ с жесткой механической характеристикой). При этом мощность приводных двигателей соизмерима с мощностью АГ. Напряжение генератора на момент замыкания поддерживалось равным 220 В [3].

Кривая зависимости тока КЗ в амперах по отношению к номинальному току от числа КЗ витков W , % для привода АГ с мягкой механической характеристикой изображена на рисунке 1.

При проведении многофакторного эксперимента [3] было выбрано три фактора, оказывающих существенное влияние на процесс:

- фактор X_1 – число витков в поврежденной фазе (фазах), считая от нулевых выводов в %;

- фактор X2 – емкость цепи самовозбуждения (мкФ);
- фактор X3 – активная нагрузка цепи генератора (Вт/фаза).

Практический интерес для исследования представляет установление корреляционной зависимости между указанными факторами. Был проведен полный факторный эксперимент 2^3 . Участок кривой, для которой проводился опыт планирования эксперимента, например, для тока КЗ на рисунке 1 расположен между точками А и В. Для остальных величин принимался такой же отрезок, так как они имеют подобную зависимость. Верхний и нижний уровни, а также интервалы варьирования для опытов с витковыми замыканиями приведены в таблице 1.

Рисунок 1 – Зависимость тока КЗ от числа замкнувшихся витков

Таблица 1

Уровни факторов и интервалы варьирования

Факторы	Уровни факторов		Интервал варьирования
	-1	+1	
X1	3	15	6
X2	28	40	6
X3	100	300	100

Коэффициенты уравнений регрессии были рассчитаны с учетом однородности дисперсий по критерию Кохрена, адекватность модели проверена по F – критерию Фишера. В результате были получены уравнения регрессии с учетом значимости коэффициентов для установившихся значений фазных (I), емкостных ($I_{\text{емк}}$), токов нагрузки ($I_{\text{нг}}$), токов КЗ ($I_{\text{кз}}$) и фазных напряжений (U). Коэффициенты взаимодействия факторов в данной статье не учитываются.

Методику применения теории планирования эксперимента рассмотрим на примере расчета для тока КЗ в случае «жесткой» системы (в случае привода генератора от АД). Для этого рассчитываем значения коэффициентов уравнения регрессии, матрица планирования приведена в таблице 2.

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ji} \cdot Y_{i,\text{cp}}}{N},$$

где $j = 0, 1, 2, \dots, k$ – номер фактора; $i = 0, 1, 2, \dots, N$ – номер строки плана.

Таким образом, значение коэффициента получается, как среднее от суммы откликов каждой строки плана, где каждому отклику присвоен знак из столбца того фактора, для которого рассчитывается коэффициент [1]. Уровни факторов и интервалы варьирования представлены в таблице 3.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента для тока КЗ

Номер точки плана	Факторы в кодовых обозначениях				Комбинации произведений в кодовых обозначениях			Действительные значения отклика по результатам параллельных опытов			Среднее значение отклика
	X ₀	X ₂	X ₂	X ₁ X ₂	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y _{ср}
1	+	+	+	+	+	+	+	55	54,4	53,8	53,8
2	+	-	-	+	+	-	-	57,28	57,3	56	56,867
3	+	-	+	-	-	+	-	54	55,2	55,4	54,867
4	+	+	-	+	-	+	+	57	57	58	57,333
5	+	+	+	-	+	-	-	36,8	35	36	35,933
6	+	-	+	+	-	-	+	61	59	61	60,333
7	+	+	-	-	-	-	-	41,4	40,8	42	41,427
8	+	-	-	-	+	+	+	52	55,0	54	53,693

Коэффициенты при взаимодействиях факторов будут

$$b_{jn} = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ji} \cdot X_{ni} \cdot Y_{i, \text{ср}}}{N},$$

где j и n = 0, 1, 2, ..., k – номера взаимодействующих факторов.

$$b_0 = \frac{53,8 + 56,867 + 54,867 + 57,333 + 35,933 + 60,333}{8} + \frac{41,427 + 53,693}{8} = 51,782.$$

Таблица 3

Уровни факторов и интервалы варьирования

Факторы	Уровни факторов		Интервал варьирования
	-1	+1	
X1	3	15	6
X2	30	70	20
X3	0,2	0,5	0,15

Аналогично рассчитываются другие коэффициенты, и уравнение регрессии будет иметь вид

$$Y = 51,782 - 4,658X_1 + 5,302X_2 - 0,548X_3 + 3,142X_1X_2 - 1,708X_1X_3 + 0,532X_2X_3 - 0,041X_1X_2X_3.$$

Для оценки отклонений отклика от среднего значения следует вычислить дисперсию воспроизводимости по данным n параллельных наблюдений плана матрицы планирования эксперимента в каждой точке по формуле

$$S^2_v = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{vcp} - Y_{vi})^2}{n - 1},$$

где S^2_v – дисперсия в v -й точке; i – порядковый номер параллельного опыта в данной точке плана; Y_{vcp} – среднее арифметическое значение отклика в m параллельных опытах в точке v ; Y_{vi} – значение отклика в v -й точке.

$$S^2_1 = \frac{(53,8 - 55)^2 + (53,8 - 54,4)^2 + (53,8 - 52)^2}{3 - 1} = 2,52.$$

Аналогично рассчитываются остальные дисперсии. Сумма дисперсий будет

$$\sum_{v=1}^N S^2_v = 2,52 + 0,564 + 0,537 + 0,333 + 0,813 + 1,333 + 0,314 + 2,442 = 8,893.$$

Имеем максимальную дисперсию $S^2_{vmax} = 2,52$ и далее находим расчетный критерий Кохрена

$$G_p = \frac{S^2_{vmax}}{\sum_{v=1}^N S^2_v} = 0,283.$$

Число степеней свободы по строкам $f_1 = 3 - 1 = 2$. По столбцам $f_2 = 8$. Табличное значение критерия $G_{кр} = 0,516$. Так как $0,283 \leq 0,516$, то Критерий Кохрена удовлетворяется.

Проверяем значимость коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента

$$S^2_{I_{кз}} = \frac{\sum_{v=1}^N S^2_v}{N} = 1,112.$$

Находится дисперсия ошибки определения коэффициентов регрессии. При равном числе параллельных опытов n во всех точках плана матрицы, ошибки определения коэффициентов определяют по формуле

$$S^2_b = \frac{S^2_{I_{кз}}}{Nn} = 0,046.$$

Находим среднеквадратичное отклонение дисперсии для ошибки определения коэффициента регрессии

$$S_b = \sqrt{\frac{S^2_{I_{кз}}}{Nn}} = 0,214.$$

Проверяем значимость коэффициентов регрессии по t -критерию Стьюдента. Для каждого коэффициента вычисляем значение t_j -критерия

$$t_j = \frac{|b_j|}{S_b},$$

где t_j – критерий Стьюдента; $|b_j|$ – модуль рассчитанного коэффициента регрессии.

$$t_0 = \frac{|b_0|}{S_b} = 240,599.$$

Остальные значения находятся аналогично.

Число степеней свободы $f_c = N(n-1) = 16$. Табличное значение критерия Фишера $t_{кр} = 2,12$.

Для проверки адекватности модели по математической модели (уравнению регрессии) вычисляется значение отклика $Y_{v,p}$ для каждой строчки плана матрицы планирования, т. е. с учетом знака фактора в плане находится алгебраическая сумма значимых коэффициентов уравнения. Находится разность между средним $Y_{v,cp}$ и расчетным $Y_{v,p}$ значениями отклика в каждой строке.

Оценку дисперсии адекватности определяют по формуле

$$S^2_{ad} = \frac{n}{N-1} \sum_{v=1}^N (Y_{v,cp} - Y_{v,p})^2,$$

где l – число значимых коэффициентов (включая b_0).

Адекватность модели проверяют по критерию Фишера

$$F = \frac{S^2_{ad}}{S^2_y},$$

где F – критерий Фишера; S^2_{ad} – оценка дисперсии адекватности.

$$S^2_{ad} = \frac{n}{N-1} \sum_{v=1}^N (Y_{v,cp} - Y_{v,p})^2,$$

$$F = \frac{S^2_{ad}}{S^2_{I_{кк}}} = 0,037.$$

Число степеней свободы по строкам $f_{f2} = N(n-1) = 16$ и число степеней свободы по столбцам $f_{f1} = N-17 = 7$. Табличное значение критерия Фишера $F_{кр} = 11,665$. При этом $11,665 > 0,037$ и условие выполняется

При вращении ААГ от привода с мягкой механической характеристикой использован индекс “1”, а в случае привода ААГ с жесткой механической характеристикой соответственно индекс “2”.

В результате обработки данных экспериментов при витковых замыканиях в обмотке одной фазы были получены уравнения для поврежденной фазы “А”, которые имеют вид:

— токи фазы статора

$$I_{A1} = 6,16 - 0,951 * X1 + 1,572 * X2 - 0,149 * X3,$$

$$I_{A2} = 4,87 - 0,864 * X1 + 0,892 * X2 + 0,228 * X3.$$

— токи емкости

$$I_{емк A1} = 6,248 - 0,938 * X1 + 1,484 * X2 - 0,175 * X3,$$

$$I_{емк A2} = 4,79 - 0,95 * X1 + 0,754 * X2 + 0,189 * X3.$$

— токи нагрузки

$$I_{нг A1} = 0,737 - 0,07 * X1 + 0,047 * X2 + 0,370 * X3,$$

$$I_{нг A2} = 0,674 - 0,08 * X1 + 0,022 * X2 + 0,348 * X3.$$

— токи в короткозамкнутых витках

$$I_{кз1} = 51,782 - 4,658 * X1 + 5,302 * X2 - 0,548 * X3,$$

$$I_{кз2} = 49,894 - 1,274 * X1 - 1,343 * X2 - 3,857 * X3.$$

— напряжение на выводах асинхронного генератора

$$U_{A1} = 189,379 - 32,571 * X1 + 16,638 * X2 - 5,729 * X3,$$

$$U_{A2} = 167,523 - 36,204 * X1 + 8,172 * X2 + 4,661 * X3.$$

Из этих зависимостей видно, что при увеличении числа замкнутых витков уменьшается ток в фазе, ток КЗ и все остальные токи. В случае привода с мягкой характеристикой с увеличением нагрузки ток в поврежденной фазе увеличивается. В случае же привода ААГ с жесткой механической характеристикой увеличение нагрузки ведет к уменьшению тока поврежденной фазы. При увеличении емкости самовозбуждения ток в фазе увеличивается. Подобным образом изменяются также емкостный ток и фазное напряжение. Уравнения же токов нагрузки имеют одинаковый характер. Ток КЗ в случае привода ААГ с жесткой механической характеристикой с увеличением емкости самовозбуждения растет в отличие от привода ААГ с мягкой механической характеристикой.

Аналогичный характер имеют зависимости тока в установившемся режиме для неповрежденных фаз. Например, для фазы В уравнения регрессии с учетом значимости коэффициентов имеют вид:

$$I_{B1} = 6,443 - 0,740 * X1 + 1,638 * X2 - 0,155 * X3,$$

$$I_{B2} = 5,104 - 0,739 * X1 + 0,939 * X2 + 0,248 * X3,$$

$$I_{\text{емк В 1}} = 6,478 - 0,713 * X1 + 1,548 * X2 - 0,169 * X3,$$

$$I_{\text{емк В 2}} = 4,992 - 0,8 * X1 + 0,858 * X2 + 0,222 * X3,$$

$$I_{\text{нг В 1}} = 0,779 - 0,046 * X1 + 0,043 * X2 + 0,387 * X3,$$

$$I_{\text{нг В 2}} = 0,718 - 0,054 * X1 + 0,021 * X2 + 0,37 * X3,$$

$$U_{B1} = 220,248 - 17,832 * X1 + 19,295 * X2 - 5,657 * X3,$$

$$U_{B2} = 185,817 - 25,333 * X1 + 9,058 * X2 + 5,642 * X3.$$

Таким образом, применение теории планирования эксперимента позволило проанализировать влияние различных факторов на основные параметры асинхронного генератора с помощью алгебраических выражений в форме, удобной для использования, что дает возможность исследовать явления, происходящие в машине.

Установлено, что с увеличением нагрузки ток в поврежденной фазе уменьшается. С увеличением емкости самовозбуждения токи в поврежденной фазе увеличивается. При увеличении числа КЗ витков происходит уменьшение токов в фазе. Подобным образом изменяются также емкостный ток и фазное напряжение.

Аналогичный характер имеют зависимости тока в установившемся режиме для неповрежденных фаз. Величина тока КЗ зависит от механической характеристики привода генератора. В случае привода с жесткой характеристикой с увеличением емкости самовозбуждения ток растет в отличие от привода с мягкой характеристикой.

1. Адлер Ю.П. Теория эксперимента: прошлое, настоящее, будущее [Текст]. / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский М.: Знание, 1982.
2. Богдан А.В. Математическая модель самовозбуждения автономного асинхронного генератора [Текст]. / А.В. Богдан, А.Н. Соболев // Известия вузов. Электромеханика. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова, 2012. – № 2. С. 47-50.
3. Богдан А.В. Математическая модель самовозбуждения автономного асинхронного генератора [Текст]. / А.В. Богдан, А.Н. Соболев // Труды Кубанского государственного аграрного университета. Краснодар: КубГАУ, 2012. – № 36. С. 322-324.