

ГАРМОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭДС ТУРБОГЕНЕРАТОРА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В. И. Милых, д.т.н., проф., Н. В. Полякова, асс., О. И. Барильник, магистр.
Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
E-mail: mvikri@kpi.kharkov.ua

Введение. В классической теории вращающихся электрических машин (ЭМ) переменного тока [1, 2] анализ ЭДС в трехфазной обмотке выполняется на основе гармонического разложения условной ступенчатой кривой магнитодвижущей силы (МДС) с последующим ее преобразованием в распределение магнитной индукции в зазоре при игнорировании реальной зубчатой структуры сердечников и насыщения магнитопровода. Такой подход сопряжен с очевидными серьезными упрощениями. Хотя он дает полезное представление о сути гармонического состава ЭДС, надеяться на адекватное количественное определение гармоник ЭДС не следует. В этом отношении новые возможности открылись с развитием численных расчетов магнитных полей. Однако, и в этом случае оказывается неприемлемым использование распределения магнитной индукции в зазоре.

Цель работы. Гармонический анализ временных функций ЭДС в обмотке статора турбогенератора (ТГ), проводимый на основе численных расчетов вращающихся магнитных полей статора и ротора с использованием временных функций магнитного потокосцепления (МПС) обмоток. Предлагаемый подход является универсальным и пригоден как при отсутствии ферромагнитных сердечников, так и в случаях их гладких и зубчатых вариантов.

В качестве демонстрационной модели возьмем ТГ мощностью 200 МВт, поперечное сечение электромагнитной системы которого представлено на рис. 1. Основные параметры ТГ составляют: число пар полюсов $p=1$; радиус ротора – 0,537 м; немагнитный зазор – 0,1 м; число витков на фазу обмотки статора $w_s=10$; расчетная длина – $l_a=5,29$ м; номинальные фазные напряжение $U_{sN}=9093$ В и ток $I_{sN}=8625$ А; частота $f=50$ Гц; относительное укорочение шага обмотки статора – 4/5.

Материал и результаты исследования. Магнитное поле в поперечном сечении ТГ описывается на основе аксиальной составляющей векторного магнитного потенциала (ВМП) A_z и численным методом, например, методом конечных элементов по программе FEMM [3] с учетом реальной геометрии и насыщения сердечников.

Эффект вращения магнитных полей достигался их многопозиционными расчетами с временным шагом Δt в моменты времени

$$t_k = k\Delta t; \quad k=0, 1, 2, \dots, K_{\min}, \quad (1)$$

где K_{\min} – минимальное число шагов, которое позволяет сформировать функцию фазной ЭДС на ее периоде изменения T в конкретном расчетном режиме.

В начальный момент времени $t = 0$ продольная ось ротора d занимает угловое положение $\varphi = 0$ (рис. 1), а затем на каждом новом временном шаге (1) ротор, вращаясь с угловой скоростью Ω , поворачивается на угловой шаг

$$\Delta\varphi = \Omega \Delta t = \frac{2\pi}{pK}, \quad (2)$$

где K – число шагов Δt на периоде T .

При этом синхронное вращение магнитного поля обмотки статора обеспечивалось вычислением ее фазных токов в соответствующие моменты времени (1):

$$i_A = I_m \cos(\omega t_k - \beta); \quad i_B = I_m \cos(\omega t_k - \frac{2}{3}\pi - \beta); \quad i_C = I_m \cos(\omega t_k + \frac{2}{3}\pi - \beta), \quad (3)$$

где $I_m = \sqrt{2}I_s$ – амплитуда фазных токов; I_s – действующее значение; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; β – угловое направление оси [4], по которой действует МДС F_s трехфазной обмотки статора, по отношению к оси d ротора, по которой действует МДС F_f обмотки ротора (β задается в зависимости от режима возбуждения ТГ).

Для объективного анализа формы ЭДС необходимы временные функции МПС фазных обмоток статора

$$\Psi_{s,k}(t_k); \quad t_k = k \cdot \Delta t; \quad k=0, 1, 2, \dots, \quad (4)$$

причем эти функции, с учетом симметрии ТГ, во всех режимах достаточно было сформировать на временном интервале, равном половине периода T .

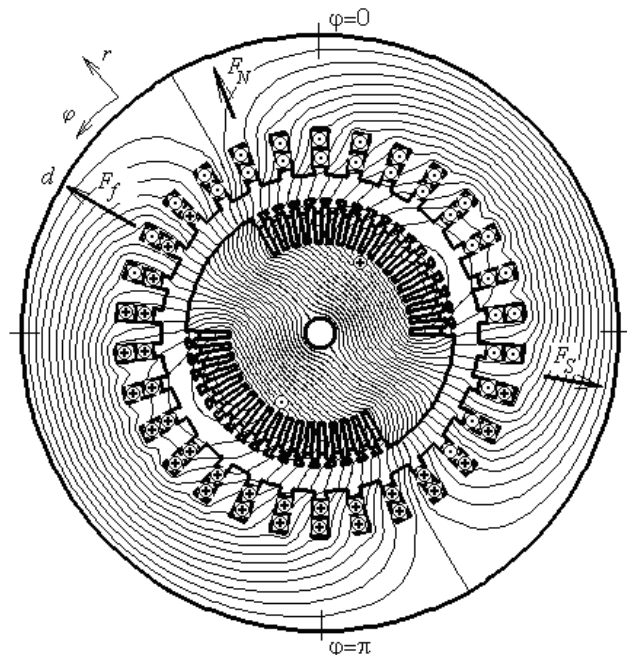


Рисунок 1 – Магнитное поле ТГ в режиме нагрузки

Мгновенные значения МПС

$$\Psi_{s,k} = \frac{2l_a w_s}{S_s} \int_{S_s} A_z dS \quad (5)$$

определялись на основе расчета магнитных полей для фиксированных моментов времени t_k по получаемому каждый раз распределению ВМП $A_z(r, \varphi)$, а интегрирование проводилось по площади поперечного сечения S_s сторон секций конкретной фазы в пределах полюсного деления ТГ. Величина Ψ_s по (5) содержит полное МПС с учетом действия всех обмоток, возбуждающих поле в конкретном расчетном режиме.

Численная функция $\Psi_{s,k}(t_k)$ по (4) непосредственно раскладывается в гармонический ряд

$$\Psi_s = \sum_{n=1,3,5\dots}^{N_g} \Psi_{m,n} \cos(n\omega t + \gamma_n), \quad (6)$$

что позволяет на основании закона электромагнитной индукции перейти к ЭДС фазной обмотки:

$$e_s = -\frac{d\Psi_s}{dt} = \sum_{n=1,3,5\dots}^{N_g} n\omega \Psi_{m,n} \sin(n\omega t + \gamma_n) \quad (7)$$

и получить начальные фазы γ_n и амплитуды гармоник ЭДС $E_{m,n} = n\omega \Psi_{m,n}$. В дальнейшем амплитуды гармоник даются в относительных единицах (о.е.) по отношению к амплитуде первой гармоники $E_{m,1}$:

$$E_{m,n}^* = E_{m,n} / E_{m,1}. \quad (8)$$

Отметим, что ряды (6) и (7) содержат только нечетные гармоники ввиду периодичности исходной функции ВМП, подчиненной условию $A_z(r, \varphi) = -A_z(r, \varphi + \pi)$, а также имеют максимально допустимый номер гармоники N_g , зависящий от выбранного для (2) числа K . Сравнительными расчетами гармонического состава ЭДС был выявлен достаточный временной шаг Δt , соответствующий углу поворота $\Delta\varphi$ по (2) на 1° .

Расчетный анализ (от магнитного поля и до гармонического состава ЭДС фазных обмоток статора) может быть проведен для различных режимов возбуждения ТГ: холостого хода, короткого замыкания или нагрузки.

В данном случае ограничимся режимом номинальной нагрузки, для которого в (3) задавались соответствующие фазные токи и $\beta = 160^\circ$ по расчетам фазовых соотношений [4]. МДС обмотки ротора $F_{RN} = 330$ кА обеспечивала в фазные ЭДС, равные U_{sN} . Мгновенное распределение направлений токов в обмотках дано на рис. 1.

Картина поля при $t=T/6$, представлена на рис. 1, где также дано направление результирующей МДС F_N .

Гармонический состав фазных ЭДС обмотки статора представлен в табл. 1 наиболее заметными гармониками. Отметим, что в этом режиме проявляются гармоники с номерами n в зоне 45-55.

Таблица 1 – Гармонический состав фазной ЭДС в режиме номинальной нагрузки

n	3	5	7	9	11	13	...	47	49	53
$E_{m,n}^*$	0,039	0,003	0,001	0,005	0,006	0,003	...	0,014	0,022	0,013
n	55	59	61	...	89	91	119	121	149	151
$E_{m,n}^*$	0,019	0,013	0,011	...	0,018	0,024	0,013	0,006	0,027	0,018

Выводы. 1. Представлена методика гармонического анализа ЭДС в обмотке статора ТГ, основанная на использовании временных функций МПС, формируемых посредством численных расчетов магнитного поля в процессе его вращения. Существенным здесь является уход от традиционного рассмотрения магнитных полей в зазоре и условно выделяемых полей рассеяния. Эта методика является наиболее детерминированной и практически лишенной целого ряда условностей и допущений, принятых в классической теории ЭМ, которая объясняет существование спектра гармоник, но не дает для них реалистичных числовых значений.

2. Так как представленная методика учитывает практически все (влияющие на гармонический состав ЭДС) факторы, то она может явиться основой для совершенствования параметров обмоток и магнитной системы ТГ и других электрических машин, обеспечивающих требуемую форму функций ЭДС в их обмотках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
2. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. В 2-х ч. Ч.2 – Машины переменного тока. Л.: Энергия, 1973.– 648 с.
3. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User’s Manual, September 26, 2006 // <http://femm.berlios.de>, 2005.
4. Милых В.И., Полякова Н.В. Анализ фазовых соотношений электромагнитных величин в турбогенераторе на основе численных расчетов магнитных полей // Электротехника і електромеханіка. – 2003. – №4. –С.59 –64.