

ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ СИЛОВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ ПРИ НЕСИММЕТРИИ НАГРУЗКИ

В.И. Милых, докт. техн. наук, **Д.В. Потоцкий**

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
ул. Кирпичева, 2, Харьков, 61002, Украина, e-mail: mvikemkpi@gmail.com

На основе численных расчетов вращающегося магнитного поля проводится оценка работы турбогенератора при несимметричной нагрузке в рамках ее стандартных ограничений. Анализируются величины и временные функции силовых действий на стержни обмотки и части ферромагнитного сердечника статора, электромагнитного момента и его пульсаций. Выявляется распределение мощности по фазным обмоткам статора и их коэффициенты мощности. Расчеты проводятся на примере турбогенератора мощностью 35 МВт. Сопоставляются результаты при несимметричной и симметричной его нагрузках. Библ. 10, табл. 3, рис. 6.

Ключевые слова: турбогенератор, несимметричная нагрузка, магнитное поле, численные расчеты, силовые действия, временные функции, распределение мощности.

Введение. В эксплуатации допускается несимметричная нагрузка турбогенераторов (ТГ) [2], регламентируемая межгосударственным стандартом ГОСТ 533-2000, действующим и в Украине. При такой нагрузке электромагнитные, тепловые и механические процессы и без того уже имеющие высокую напряженность [6], становятся особенно критичными, о чем уже шла речь в [3, 4].

Рассмотрению разных вариантов электрической несимметрии уделяется пристальное внимание, о чем свидетельствуют следующие примеры. Так в работе [8] проводится моделирование и анализ энергосистем для исследования потока мощности в распределительных сетях, работающих в условиях асимметрии. В [10] предлагается оптимальное регулирование напряжения в распределительных системах с несбалансированными нагрузками. В [7] для диагностики эксцентриситета ротора турбогенератора предлагается метод разделения фаз, основанный на специальном теоретическом анализе через симметричные компоненты токов фазных обмоток. В [1] также показывается, что при моделировании эксцентриситета ротора необходимо учитывать несимметрию этих токов.

Для исследования проблем электромагнитного и силового характера при эксплуатации ТГ как при симметричной [5], так и несимметричной нагрузках [1-4] эффективными являются численные методы расчета магнитных полей в сочетании с быстродействующими современными компьютерами и эффективным общим и собственным программным обеспечением, что и предопределило новизну предоставляемых далее результатов. Применение этого симбиоза позволяет расширить зоны исследования электромагнитных процессов в ТГ от их локальных упрощенных частей [2] до полной электромагнитной системы на ее активной части в пределах длины сердечников [3, 4]. И такая постановка задачи становится чрезвычайно сложной, поэтому в данной работе, как и в [3, 4], делается допущение отсутствия реакции вихревых токов в бочке ротора и в других элементах ТГ.

Цель работы. Данная работа продолжает названные исследования ТГ при несимметричной нагрузке [3, 4], и теперь ее целью является расчетный анализ энергетических и силовых процессов в ТГ в рамках ограничений указанного стандарта. Это проводится в электромагнитной системе ТГ на ее активной длине посредством выявления и анализа временных функций электродинамических усилий в стержнях обмотки статора, силовых действий на части его ферромагнитного сердечника, элект-

тромагнитного момента (ЭММ), а также распределения активной мощности по фазным обмоткам.

Объект исследования. Для иллюстративных расчетов рассматривается ТГ мощностью 35 МВт, поперечное сечение электромагнитной системы которого дано на рис. 1. Он имеет номинальные фазные напряжение $U_{sN}=6,3$ кВ и ток $I_{sN}=2315$ А, частоту $f_s=50$ Гц, ток возбуждения $I_f=632$ А. Еще параметры ТГ есть в [3, 4], в том числе активная длина $l_a=2,7$ м и радиус расточки сердечника статора $r_{st}=0,434$ м.

Основы численно-полевого анализа работы ТГ на несимметричную нагрузку излагаются в [3, 4]. Несимметричная система его фазных токов формируется с помощью известного метода симметричных составляющих и на основании стандарта ГОСТ 533-2000 принимается, что токи обратной последовательности в фазных обмотках статора не превышают $0,08 \cdot I_{sN}$, а наибольший из фазных токов ограничен значением I_{sN} . Система фазных токов представляется их временными функциями:

$$i_A = I_{mA} \cdot \cos(\omega \cdot t_k + \beta_{Ia}); \quad i_B = I_{mB} \cdot \cos(\omega \cdot t_k + \beta_{Ib}); \quad i_C = I_{mC} \cdot \cos(\omega \cdot t_k + \beta_{Ic}), \quad (1)$$

где $\omega=2\pi f_s$ – угловая частота; I_{mA}, I_{mB}, I_{mC} – амплитуды токов.

Параметры фазных токов выбирается, предполагая, что при возникновении несимметричной нагрузки ток возбуждения I_f сохраняется и ТГ продолжает вырабатывать номинальную мощность, обеспечиваемую приводной турбиной в штатном режиме. Действующие значения и начальные фазы токов составили: $I_A=2170$ А; $I_B=2315$ А; $I_C=2015$ А; $\beta_{Ia}=-158,1^\circ$; $\beta_{Ib}=-284,8^\circ$ и $\beta_{Ic}=-45,1$. Эта система токов дает сдвиг МДС обмотки статора F_s относительно МДС обмотки возбуждения F_f на угол β , равный $-167,2^\circ$ (рис. 1). Вектор МДС F_f отображает совместное действие обмоток ротора и статора.

Значения анализируемых электрических, энергетических и силовых величин получаются на основе расчета магнитного поля ТГ, а их временные функции – многопозиционными такими расчетами, как и в [3-5]. Для этого задаются временной ряд с шагом Δt и соответствующие угловые позиции ротора с шагом $\Delta\alpha$ при синхронном вращении магнитного поля статора переменными токами (1).

В поперечном сечении ТГ (рис. 1) магнитное поле в каждой позиции рассчитывается методом конечных элементов с учетом насыщения магнитопровода по программе FEMM [9] как стационарное в двухмерной постановке, как это представлено в [3-5]. С учетом периодичности, временные функции сформированы при числе расчетных позиций K , составляющем 181, с шагом поворота ротора $\Delta\alpha=1^\circ$ при соответствующем интервале времени Δt .

Картина магнитного поля при несимметричной нагрузке в исходный момент времени дана на рис. 1 силовыми линиями. В целом она соответствует и случаю симметричной нагрузки, для которой

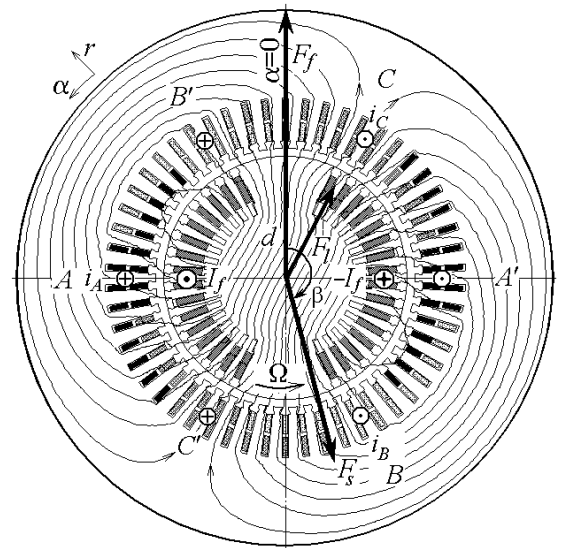


Рис. 1

картина поля есть в [3]. Для оценки изменений, происходящих при переходе к несимметричной нагрузке, все дальнейшие результаты сравниваются с аналогами при симметричной нагрузке ТГ.

Результаты расчетов силовых процессов и энергетических параметров.

Электродинамические усилия, действующие на стержни обмотки статора, определяются на основе закона Ампера, как и в работах из обзора [5], в виде их радиальной и угловой составляющих:

$$F_{Ar} = l_a \int_S [B_\alpha \cos(\alpha - \alpha_n) + B_r \sin(\alpha - \alpha_n)] J_z dS; \quad F_{A\alpha} = l_a \int_S [B_\alpha \sin(\alpha - \alpha_n) - B_r \cos(\alpha - \alpha_n)] J_z dS, \quad (2)$$

где B_r, B_α – радиальная и угловая составляющие магнитной индукции; α_n – угловая координата оси паза, к которой приводятся силы; S – площади сечения стержней паза.

Расчеты по (2) в K моментов времени дают дискретные временные функции сил:

$$F_{Ar}(t_k); \quad F_{A\alpha}(t_k), \quad k=1,2,\dots,K. \quad (3)$$

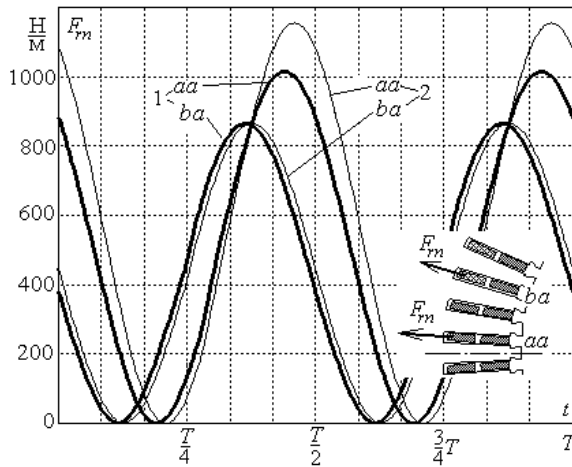


Рис. 2

Графики сил в исчислении на единицу аксиальной длины даются на рис. 2 их радиальной составляющей, так как другая была незначительной.

Ось времени масштабирована в долях от периода T токов (1), имеющих частоту f_s . Несущая частота f_{s2} сил в два раза больше, а период T_2 равен $T/2$. Графики здесь и далее обозначают: 1 – несимметричная, 2 – симметричная нагрузки.

Конкретно, на рис. 2 рассматриваются стержни в двух обозначенных пазах, расположенных на

рис. 1 в левой части сечения ТГ над поперечной осью q . В пазу aa силы достигают больших значений, потому что здесь располагаются стержни одной фазной обмотки с суммарной амплитудой тока $I_{sn} = 2 I_{sm}$, где I_{sm} – амплитуда фазного тока. В пазу ab со стержнями разных фаз силы меньше, как и ток I_{sn} . В пазу aa при несимметричной нагрузке силы уменьшились по сравнению со случаем симметричной нагрузки, но это только потому, что ток фазы A стал меньше номинального. А вот в пазу со стержнями фазы B , ток которой остался номинальным, силы оказываются такими же, как и при симметрии с номинальными токами. Это из-за того, что силы в пазу в основном зависят от суммарного тока в нем, и мало зависят от общей структуры и величины магнитного поля во всем ТГ.

Знать силы, представленные на рис. 2, важно ввиду того, что именно они приводят к усталостному износу пазовой изоляции из-за ее крошения и истирания при «ерзании» стержней.

Силовые действия на части ферромагнитного сердечника статора после расчета магнитного поля определяются через тензор магнитного натяжения (ТМН) Максвелла, описывающий давление на единицу поверхности в немагнитной части области расчета, как это было представлено в [5].

Радиальная и касательная составляющие ТМН на цилиндрической поверхности в зазоре, Н/м^2 :

$$f_{Tr} = \frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 - B_\alpha^2); \quad f_{T\alpha} = \frac{1}{\mu_0} (B_r \cdot B_\alpha), \quad (4)$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

Силовые действия на зубцы сердечника статора представляются результирующей угловой силой $F_{T\alpha}$ на дуге с радиусом r_δ вблизи расточки этого сердечника в пределах его зубцового деления τ_s (рис. 3). Конкретно, искомая сила на один зубец, расположенный в левой части рис. 1 на оси q :

$$F_{T\alpha} = r_\delta l_a \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} [f_{T\alpha} \cos(\alpha - \alpha_z) + f_{Tr} \sin(\alpha - \alpha_z)] d\alpha, \quad (5)$$

где α_1, α_2 – начальная и конечная угловые координаты указанной дуги; α_z – угловая координата оси зубца, к которой приводится сила.

Многопозиционные расчеты дают дискретную временную функцию силы

$$F_{T\alpha}(t_k), \quad k=1,2,\dots,K, \quad (6)$$

которая представлена на рис. 3 со значениями на единицу аксиальной длины ТГ.

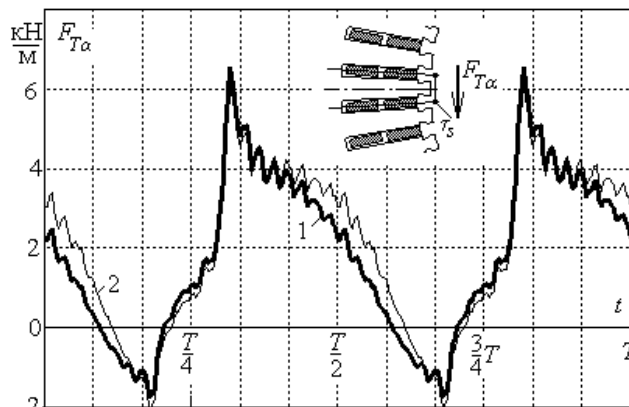


Рис. 3

Эта сила достигает серьезных значений и является знакопеременной со значительной постоянной составляющей. Такая сила приложена к каждому из зубцов и повторяется с определенным временным сдвигом, а в сумме все они создают электромагнитный момент. Расчетный анализ силы $F_{T\alpha}$ имеет практический интерес, так как наблюдающиеся в условиях длительной эксплуатации ТГ усталостные повреждения зубцов сердечника статора вызваны именно ею.

Силы, действующие на сердечник статора в целом в поперечном сечении ТГ, также определяются на основе составляющих ТМН (4). Конкретно рассматривается радиальная сила

$$F_{Tr} = r_\delta l_a \int_0^\pi [f_{Tr} \cos(\alpha - \alpha_q) - f_{T\alpha} \sin(\alpha - \alpha_q)] \cdot d\alpha, \quad (7)$$

действующая на половину сечения сердечника. Она определяется на дуге окружности в пределах полюсного деления ТГ, проведенной вблизи расточки сердечника статора. Эта сила приведена к горизонтальной оси, расположенной под углом $\alpha_q=90^\circ$.

Расчеты в заданные моменты времени дают дискретные временные функции силы

$$F_{Tr}(t_k), \quad k=1,2,\dots,K, \quad (8)$$

представленные на рис. 4, где даны направления сил, приложенных к половинкам сердечника статора (значения – на единицу аксиальной длины ТГ).

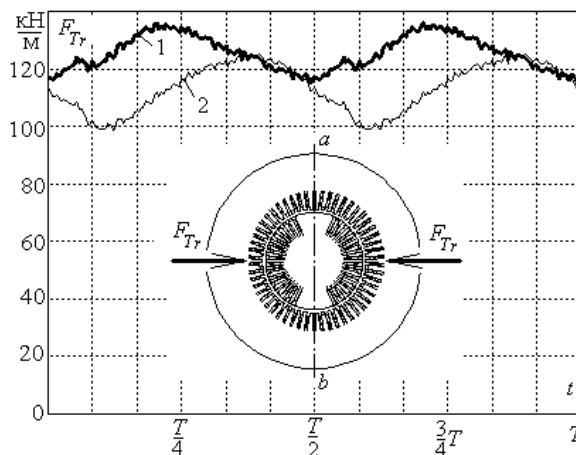


Рис. 4

Эти силы являются пульсирующими со значительной долей постоянной составляющей. Они приложены к аксиальному сечению сердечника по линии ab . Фактически, при работе ТГ линия ab вращается вместе с магнитным полем, и по расточке сердечника «бегут» волны силы F_{Tr} . Ее посто-

янная составляющая создает напряженное «стянутое» состояние сердечника до «бегущего» эллипса, а переменная составляющая еще накладывает на эту деформацию пульсации с двойной частотой.

В целом на рис. 4 видно, что при несимметричной нагрузке силы F_{Tr} заметно увеличились. При длительной эксплуатации это может ускорить повреждения стержней сердечника, а также ослабить монолитность его шихтованных пакетов, что и наблюдается в действительности.

Электромагнитный момент взаимодействия ротора и статора определяется в программе FEMM [9] по предусмотренной процедуре на скрипте Lua через угловую составляющую ТМН (4). Основой вычисления является поверхностный интеграл по площади S_δ поперечного сечения зазора:

$$M_{em} = \frac{l_a}{\mu_0(r_s - r_r)} \int_{S_\delta} r \cdot B_r \cdot B_\alpha \cdot dS, \quad (9)$$

где r_r и r_s – радиусы, ограничивающие зазор со сторон ротора и статора.

Расчеты в K моментов времени дают дискретную временную функцию ЭММ

$$M_{em}(t_k), k=1,2,\dots, K, \quad (10)$$

которая представлена на рис. 5.

Эта функция, прежде всего, характеризуется средней величиной ЭММ

$$M_{emav} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K M_{em,k}, \quad (11)$$

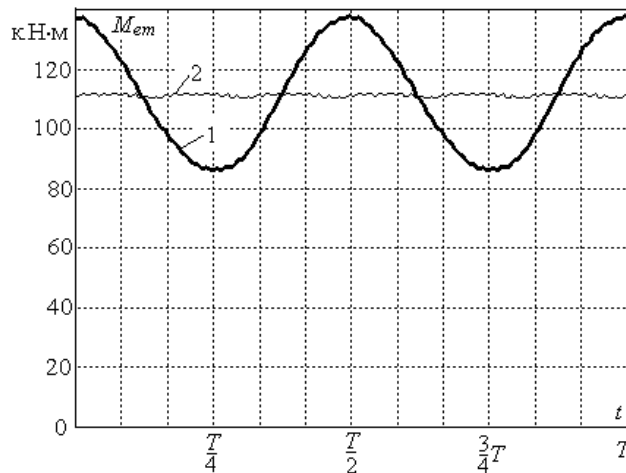


Рис. 5

значения которой для двух видов нагрузки приведены в табл. 1.

Здесь же даны значения соответствующей электромагнитной мощности ТГ:

$$P_{em} = M_{emav} \cdot \Omega, \quad (12)$$

где Ω – угловая скорость ротора.

В функциях $M_{em}(t_k)$ можно выделить визуально и гармоническим разложением пульсации с «зубцовой» частотой статора, а также с частотой $f_{s6}=6f_s$, вызванной дискретной фазной структурой обмотки статора. В случае симметричной нагрузки указанные пульсации на фоне M_{emav} выражены слабо, в то время как пульсации из-за несимметрии, имеющие двойную частоту $f_{s2}=2f_s$, в пределах глобального периода T , очень значительны.

Функция $M_{em}(t)$ была разложена в гармонический ряд с несущей частотой f_{s2} . Амплитуда основной – второй гармоники ЭММ $M_{em,2}$ представлена в табл. 1 и при несимметрии составила около 23 % от постоянной составляющей M_{emav} , что, безусловно, вызовет очень серьезные проблемы эксплуатации и долговечности ТГ ввиду вибраций.

Электрические, а за ними и энергетические величины в ТГ выявляются на основе временных функций магнитного потокосцепления (МПС) фазных обмоток статора [3]

Таблица 1

Тип нагрузки	Параметры		
	M_{emav} , кН·м	P_{emav} , МВт	$M_{em,2}$, кН·м
симметрия	111,36	34,986	–
несимметрия	111,60	35,059	25,87

$$\Psi_s(t_k), k=1, 2, \dots, K, \quad (13)$$

где индекс s является обобщающим для фазных индексов A, B и C .

Определение МПС после расчета магнитного поля выполняется по соответствующим процедурам – скриптам Lua, интегрированным в программу FEMM [9].

Дискретные временные функции МПС, сформированные по расчетам вращающегося магнитного поля, раскладываются по известным правилам в гармонический ряд, как и в [3], и от них делается переход к ЭДС фазных обмоток:

$$e_s = -\frac{d\Psi_s}{dt} = \sum_{v=1,3,5,\dots}^{N_g} v\omega\Psi_{m,v} \cos(v\omega t + \gamma_{Ev}), \quad (14)$$

где $\Psi_{m,v}, E_{m,v}=v\omega\Psi_{m,v}$ – амплитуды гармоник МПС и ЭДС; действующие значения ЭДС $E_v = E_{m,v}/\sqrt{2}$.

Функции ЭДС (14) для разных фазных обмоток при несимметричной нагрузке оказались, естественно, разными и в их характере проявляется сильное влияние высших гармоник. Гармонический анализ выходит за рамки данной статьи, и далее рассматриваются только первые гармонические составляющие электрических величин.

Из (14) берутся начальные фазы фазных ЭДС γ_{Ea}, γ_{Eb} и γ_{Ec} и определяются их фазовые сдвиги относительно фазных токов: $\varphi_{IEa} = \gamma_{Ea} - \beta_{Ia}$;

$\varphi_{IEb} = \gamma_{Eb} - \beta_{Ib}$; $\varphi_{IEc} = \gamma_{Ec} - \beta_{Ic}$. Для первых гармоник электрических величин соотношения временных фаз и действующих значений видны на векторной диаграмме на рис. 6.

Фазные напряжения (обобщенно U_s) определяются в символической форме $\underline{U}_s = \underline{E}_s + \underline{E}_v - \underline{U}_R$. При этом учитываются падения напряжения $\underline{U}_R = R_s \underline{I}_s$ на активном сопротивлении R_s , а также ЭДС $\underline{E}_v = -jX_v \underline{I}_s$ от потока лобового рассеяния фазной обмотки, где X_v – соответствующее индуктивное сопротивление. Эти сопротивления находятся при проектировании ТГ: $R_s = 0,00537$ Ом; $X_v = 0,134$ Ом.

По комплексам напряжений определяются их начальные фазы, а по ним – и соответствующие фазовые сдвиги φ_s относительно своих токов. Результаты расчетов представлены в табл. 2, где также даны коэффициенты мощности $\cos \varphi_s$ и активные мощности соответствующих фазных обмоток

$$P_s = U_s I_s \cos \varphi_s. \quad (15)$$

В итоге для всех фазных обмоток получается суммарная активная мощность ТГ P_a , которая составила 34,90 МВт. То есть при той же механической мощности, получаемой ТГ от приводной

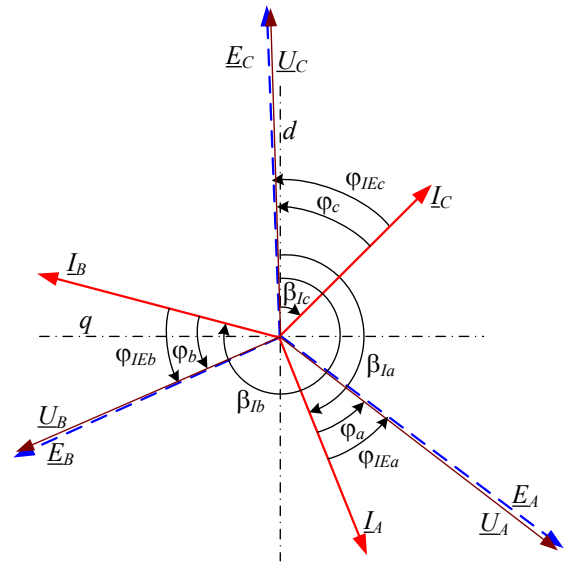


Рис. 6

Таблица 2

Фаза	I_s, A	U_s, B	$\varphi_s, \text{град}$	$\cos \varphi_s$	$P_s, \text{МВт}$
A	2170	7489	30,55	0,861	14,00
B	2315	6174	38,28	0,785	11,22
C	2015	7029	46,86	0,684	9,69

турбины, как и при симметричной нагрузке, выработана практически номинальная электрическая мощность. При несимметричной нагрузке при номинальном токе возбуждения, но с уменьшенными токами статора и, соответственно, при уменьшенной реакцией якоря, это произошло за счет увеличения ЭДС и напряжений ввиду увеличения результирующих МПС фазных обмоток статора.

Электромагнитная P_{emav} и активная P_a мощности ТГ при разных вариантах нагрузки сведены в табл. 3. Здесь же представлены электрические потери мощности обмотки статора

$$\Delta P_{el_s} = R_s (I_A^2 + I_B^2 + I_C^2). \quad (16)$$

Таблица 3

Тип нагрузки	Параметры		
	P_a , МВт	P_{emav} , МВт	ΔP_{el_s} , кВт
симметрия	34,900	34,986	86
несимметрия	34,983	35,059	76

Магнитные и механические потери мощности находятся за рамками данных исследований, поэтому должен быть баланс мощностей

$$P_{emav} = P_a + \Delta P_{el_s}. \quad (17)$$

Его выполнение в табл. 3 свидетельствует о высокой точности сходимости численно-полевых расчетных результатов и адекватности полученных значений механических и электрических величин.

Выводы.

1. По рассмотренному комплексу взаимосвязанных явлений, в рамках стандартных ограничений несимметричного режима работы ТГ, очевидно, что пульсации ЭММ при такой нагрузке явно выражены и достигают 23% от его среднего значения; силовые воздействия на стержни обмотки и зубцы сердечника статора имеют сложный характер, но в целом соответствуют тому, что было при симметричной нагрузке; силы, стягивающие половинки сердечника статора, заметно увеличены.

2. Активная мощность ТГ по фазным обмоткам распределена весьма неравномерно с расхождением на 37% от среднего значения фазных мощностей. Напряжения и коэффициенты мощности разных фазных обмоток также заметно отличаются, как и фазные токи, несимметрия которых и является причиной определенных здесь усложнений эксплуатации ТГ.

1. Васьковський Ю.М., Мельник А.М. Електромагнітні віброзбуджуючі сили в турбогенераторі з урахуванням несиметрії струмів в обмотці статора // Технічна електродинаміка. – 2017. – № 1. – С. 52 – 57.

2. Зозулін Ю.В., Антонов О.С., Бичік В.М., Боричевський А.М., Кобзар К.О., Лівшиць О.Л., Ракогон В.Г., Роговий І.Х., Хаймович Л.Л., Чередник В.І. Створення нових типів та модернізація діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій // Харків: ПФ «Колегіум». – 2011.– С. 68-76.

3. Милых В. И. Организация численно-полевых расчетов электромагнитных процессов в турбогенераторе при его несимметричной нагрузке // Вісник НТУ «ХП». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 11 (1183). – С. 3–10.

4. Милых В. И. Численно-полевой анализ электромагнитных процессов в роторе турбогенератора при несимметричной нагрузке // Технічна електродинаміка. – 2017. – №3. – С.??-??. (находится в редакции)

5. Милых В. И., Полякова Н. В. Численно-полевые расчеты электромагнитных параметров турбогенераторов // Вісник НТУ «ХП». Тематичний випуск «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Харків : НТУ «ХП», 2014. – №38(1081). – С.3-18.

6. Тутко О. І. О., Васьковський Ю. М., Крамарський В. А., Кучинський К. А., Ахременко В. Л. Фізичні аспекти проблеми надійності і ефективності потужних турбогенераторів // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2011. – Вип. 29. – С. 90-103.

7. Claudio Bruzese. 2-Pole turbo-generator eccentricity diagnosis by split-phase current signature analysis // 2013 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). – Pp. 349 - 357, doi: 10.1109/DEMPED.2013.6645739.

8. Denisa Rusinaru, Leonardo Geo Manescu, Marian Ciontu, Miron Alba. Three-phase load flow analysis of the unbalanced distribution networks // 2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE). – 2016. – Pp. 1-5, doi: 10.1109/ICATE.2016.7754621.

9. Finite Element Method Magnetics : OldVersions. FEMM 4.2 11Oct2010 Self-Installing Executable [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>.

10. Tiago Soares, Vitor; José Carlos, M. Vieira. Optimal voltage regulation in distribution systems with unbalanced loads and distributed generation // 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia). – 2016. – Pp. 942 - 947, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2016.7796512.

УДК 621.313

Чисельно-польовий аналіз силових та енергетичних процесів в турбогенераторі при несиметрії навантаження

В.І. Мілих, докт. техн. наук, Д. В. Потоцький

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

вул. Кирпичова, 2, Харків, 61002, Україна, e-mail: mvikemkpi@gmail.com

На основі чисельних розрахунків магнітного поля, що обертається, проведена оцінка роботи турбогенератора при несиметричному навантаженні у рамках її стандартних обмежень. Аналізуються величини і часові функції силових дій на стержні обмотки і частини феромагнітного осердя статора, електромагнітного моменту і його пульсацій. Виявляється розподіл потужності по фазних обмотках статора і їхні коефіцієнти потужності. Розрахунки виконані на прикладі турбогенератора потужністю 35 МВт. Зіставлені результати при несиметричному і симетричному його навантаженнях. Бібл. 10, табл. 3, рис. 6.

Ключові слова: турбогенератор, несиметричне навантаження, магнітне поле, чисельні розрахунки, силові дії, часові функції, розподіл потужності.

The numerical-field analysis of power and energy processes in the turbo-generator at load unbalance

V.I. Milykh, D.V. Pototskyi

National technical university "Kharkov polytechnic institute", 2, Kyrpychova str., 61002 Kharkov, Ukraine

Purpose.** Assessing the impact of load asymmetry of turbo-generator (TG) on the power and energy processes in it based on the numerical-field analysis within the constraints regulated by the standards. **Methodology.** Mathematical model of TG has been constructed on the method of symmetrical components of the three-phase current system. The unbalanced system of the currents is used for calculations of rotating magnetic fields. Thus the temporal functions of the electromagnetic and power quantities which are subjected to the harmonic analysis are obtained. **Results.** Calculations are conducted on a three-phase 35 MW TG during its work under autonomous unbalanced loading. The analysis of the temporal functions of the electromagnetic torque and the forces acting on the winding cores and the stator core ferromagnetic part has been executed. The distribution of power of their coefficients according to the phase windings was revealed. **Originality.** Problems of the TG exploitation at unbalanced loading are detected by the consideration of its electromagnetic system on the whole, but not its simplified local parts, as usual. The basis of the analysis is a new method constructed on the discrete temporal functions of the various quantities revealed by a multiposition numerical calculations of rotating magnetic fields. **Practical value.** Analysis of the TG work at unbalanced loading showed the problems of a power and electromagnetic character. It is shown that the temporal functions of the forces acting on the stator core rods and its time generally similar to what it was at the symmetrical load, but the compressive forces acting on the core in general increased. Electromagnetic moment has a very strong pulsation which amplitude reaches 23% of its average value. The powers and their phase windings coefficients are distributed very unevenly. The TG design problems, the solutions of which must take into account the information received, are indicated. This makes it possible to provide for measures to ensure a durable and reliable operation of the TG. **References 10, tables 3, figures 6.

Keywords: turbo-generator, unbalanced loading, magnetic fields, numerical calculations, action of the force, temporal functions, power distribution.

1. Vaskovskyi Yu.M., Melnyk A. M. The electromagnetic vibration disturbing forces in turbogenerator with a glance of current asymmetry of stator winding. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2017, no. 1, pp. 52-57. (Ukr.)

2. Zozulin Yu.V., Antonov O.Ye., Bychik V.M., Borychevs'kyi A.M., Kobzar K.O., Livshyts O.L., Rakohon V.H., Rohovyy I.Kh., Khaymovych L.L., Cherednyk V.I. Creation of new types and modernization of the existing turbogenerators for the thermal electric stations. – Kharkiv: PF «Kolehium», 2011, pp. 68-76. (Ukr.)

3. Milykh V. I. Organization of the numerical-field calculations of electromagnetic processes in a turbogenerator at its asymmetrical loading // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion". – Kharkiv : NTU "KhPI". 2016, no. 11 (1183), pp. 3–10. (Rus.)

4. Milykh V.I. The numerically-field analysis of electromagnetic processes in the turbo-generator rotor under unbalanced loading. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2017, no. 3, pp. ??-??. (Rus.)

- 5 *Milykh, V. I., Polyakova N. V.* Numerically-field calculations of the electromagnetic parameters of turbogenerators // Bulletin of NTU "KhPI". Thematic edition "Electric machines and electromechanical energy conversion". Kharkiv : NTU "KhPI". 2014, no. 38(1081), pp. 3-18. (Rus.)
- 6 *Titko O.I., Vaskovskiy Yu.N., Kramarskyi V.A., Kuchynskiy K.A., Ahremenko V.L.* Physical aspects of a problem reliability and efficiency of powerful turbogenerators // Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. 2011, no. №29, pp. 90–103. (Ukr.)
7. *Claudio Bruzzese.* 2-Pole turbo-generator eccentricity diagnosis by split-phase current signature analysis // 2013 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDMPED). Pp. 349 - 357, doi: 10.1109/DEMPED.2013.6645739.
8. *Denisa Rusinaru, Leonardo Geo Manescu, Marian Ciontu, Miron Alba.* Three-phase load flow analysis of the unbalanced distribution networks // 2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE). 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICATE.2016.7754621.
9. Finite Element Method Magnetics : OldVersions. FEMM 4.2 11Oct2010 Self-Installing Executable, available at: <http://www.femm.info/wiki/OldVersions>.
10. *Tiago Soares, Vitor; José Carlos, M. Vieira.* Optimal voltage regulation in distribution systems with unbalanced loads and distributed generation // 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia). 2016, pp. 942 - 947, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2016.7796512.

Надійшла 27.09.2016