

ОРГАНИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМЕ НАГРУЗКИ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ЗАДАНЫХ ЕГО ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Вирішується завдання чисельного розрахунку магнітного поля в режимі навантаження турбогенератора, коли необхідно забезпечити задані його вихідні параметри: напруга, струм і коефіцієнт потужності. Запропонований ефективний алгоритм ітераційного процесу, що швидко сходиться і протягом якого знаходяться струм збудження і часова фаза струмів обмотки статора, а також показана чисельно-польова підготовка початкових значень цих величин.

Решается задача численного расчета магнитного поля в режиме нагрузки турбогенератора, когда необходимо обеспечить заданные его выходные параметры: напряжение, ток и коэффициент мощности. Предложен эффективный алгоритм быстро сходящегося итерационного процесса, в ходе которого находятся ток возбуждения и временная фаза токов обмотки статора, а также показана численно-полевая подготовка начальных значений этих величин.

Введение. Численные расчеты магнитных полей турбогенератора (ТГ) методом конечных разностей (МКР) [1] или методом конечных элементов (МКЭ) [2] обеспечивают весьма точное отображение его конструкции и насыщения магнитопровода. В итоге можно найти с высокой точностью целый ряд электромагнитных параметров и характеристик ТГ [3].

Расчеты магнитных полей ТГ проводятся для разных режимов его возбуждения [4], а наиболее сложным является режим нагрузки [5, 6]. Для того, чтобы расчет обеспечил именно заданные выходные параметры ТГ, такие как фазное напряжение U_s , фазный ток I_s и коэффициент мощности $\cos \varphi_s$, а, значит, и активную электрическую мощность

$$P_a = 3U_s I_s \cos \varphi_s, \quad (1)$$

надо непосредственно в процессе полевого расчета определять два параметра – ток возбуждения I_f и начальную фазу токов статора β [4, 5]. Это приводит к необходимости использования итерационного процесса расчета магнитного поля в режиме нагрузки, а также необходимости предварительного использования полевых расчетов в других режимах.

Целью работы является представление организации расчета магнитного поля в режиме нагрузки ТГ и предшествующих режимах, а также представление разработанного строго детерминированного и быстро сходящегося процесса расчета поля вместо использовавшегося ранее длительного итерационного процесса с интуитивной организацией [4, 5].

Объект исследования. Для иллюстрации решения задачи используется модель электромагнитной системы ТГ, изображенная на рис. 1 в поперечном сечении. Здесь показана ориентация координат (r, α) полярной системы и условные положительные направления токов в обмотках [5] (если в данный момент времени ток положителен – он направлен именно так, если отрицательный – наоборот). Из трех фазных обмоток статора затемнением проводников в пазах показаны фазные зоны одной – $A-A'$.

Этот ТГ подробнее представлялся в [5, 6]. Его номинальные параметры: активная мощность $P_{aN} = 200$ МВт; фазное напряжение $U_{sN} = 9093$ В и ток $I_{sN} = 8625$ А; коэффициент мощности $\cos \varphi_{sN} = 0,85$; частота $f = 50$ Гц, обмотка статора укороченная, двухслойная.

Общие аспекты расчета магнитного поля. Стационарное магнитное поле в поперечном сечении ТГ описывается дифференциальным уравнением:

$$\operatorname{rot} \left[\frac{1}{\mu} \operatorname{rot} (\vec{k} A_z) \right] = \vec{k} J_z, \quad (2)$$

где A_z, J_z – аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока; μ – абсолютная магнитная проницаемость (АМП); k – орт.

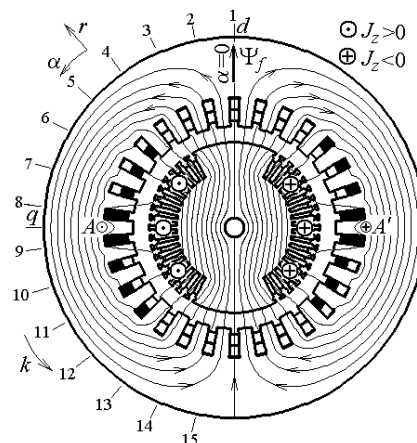


Рис. 1. Электромагнитная система турбогенератора и его магнитное поле в режиме XX ($A_{max} = 0,4661$ Вб/м)

Общие аспекты численного расчета магнитного поля неоднократно излагались [1-6] и общеизвестны. Поэтому будем считать, что магнитное поле как функция $A_z(r, \alpha)$ в поперечном сечении ТГ успешно рассчитано либо МКР [1] по собственной программе, либо МКЭ по общедоступной программе FEMM [2]. В обоих случаях результатом расчета является дискретное распределение ВМП в узлах сеточной или конечно-элементной структуры. Представляя структуру силовых линий магнитного поля $A_z = const$, будем ограничиваться указанием максимального для конкретно представляемого режима абсолютного значения ВМП A_{max} .

К важнейшим величинам при анализе электромагнитных параметров ТГ относится магнитное потокоосцепление (МПС) [3-6]. По рассчитанному распределению ВМП эта величина находится достаточно просто. Здесь будем оперировать с МПС фазной обмотки статора $A-A'$ (рис. 1)

$$\Psi = N_s l_a \left(\frac{1}{S_A} \sum_{j=1}^{K_A} A_{z,av,j} \Delta S_j - \frac{1}{S_{A'}} \sum_{j=1}^{K_{A'}} A_{z,av,j} \Delta S_j \right), \quad (3)$$

где N_s – число витков этой обмотки; l_a – ее активная длина; $S_A, S_{A'}$ – площади сечения по всем токнесущим элементам фазных зон A и A' ; $K_A, K_{A'}$ – числа элементов их дискретизации; $A_{z,av,j}$ – среднее значение ВМП в j -том элементе площадью ΔS_j .

Основой связи между ЭДС и МПС фазной обмотки и выявления фазовых соотношений электромагнитных величин в ТГ является разложение угловой функции МПС $\Psi(\alpha)$ в ряд Фурье [3, 5-7]. Поясним это с помощью рис. 1, где для примера представлена структура магнитного поля ТГ в режиме холостого хода (ХХ).

После расчета магнитного поля его структура (рис.1) – распределение ВМП фиксируется. Тогда остается по (3) "собрать" МПС фазной обмотки $A-A'$ в ее разных угловых позициях.

Расположение фазной обмотки $A-A'$, показанное на рис. 1, соответствует позиции 1 с угловым положением $\alpha_1=0$. В этом положении средняя плоскость обмотки совпадает с поперечной осью q , а ее ось намагничивания ориентируется по продольной оси d .

Затем затемненные на рис. 1 фазные зоны каждый раз поворачиваются на одно зубцовое деление $\Delta\alpha$ и вычисления МПС Ψ проводятся как минимум в 15 позициях этих зон обмотки, которые обозначены на рис. 1. Прохождения полюсного деления τ_p [полупериода функции $\Psi(\alpha)$] достаточно, ведь по условию периодичности магнитного поля

$$\Psi(\alpha + \tau_p) = -\Psi(\alpha). \quad (4)$$

В каждой позиции по формуле (3) производится определение МПС в фазных зонах A и A' и таким способом получается в численной форме угловая функция МПС на указанной ее половине периода:

$$\Psi_k(\alpha_k); \quad \alpha_k = (k-1) \cdot \Delta\alpha; \quad k = 1, 2, 3, \dots, K, \quad (5)$$

где k – номера угловых позиций фазной зоны обмотки статора (рис.1); K – число интервалов $\Delta\alpha$ в пределах полюсного деления τ_p (в случае рассматриваемой конструкции ТГ $K=15$).

Полученная численная угловая функция МПС (5) разлагается в косинусный гармонический ряд, как это подробнее изложено в [6], и выделяется для использования первая пространственная гармоника

$$\Psi = \Psi_m \cos(\alpha + \gamma). \quad (6)$$

Здесь амплитуда и аргумент (начальная фаза)

$$\Psi_m = \sqrt{s_1^2 + c_1^2}; \quad \gamma = -\arctg \frac{s_1}{c_1}, \quad (7)$$

где синусные и косинусные амплитуды [7]:

$$s_1 = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Psi_k \sin \alpha_k; \quad c_1 = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K \Psi_k \cos \alpha_k.$$

С учетом того, что при вращении магнитного поля $\alpha=\omega t$, вместо угловой функции МПС можно оперировать с временной функцией

$$\Psi = \Psi_m \cos(\omega t + \zeta), \quad (8)$$

где $\omega=2\pi f$ – угловая частота; t – время.

В (8) временная начальная фаза ζ заняла место пространственной начальной фазы γ , причем, как показано в [5], $\zeta = -\gamma$.

На основе закона электромагнитной индукции можно через (8) определить функцию фазной ЭДС

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = \omega \Psi_m \cos(\omega t + \zeta - \pi/2) \quad (9)$$

и ее действующее значение для первой гармоники

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega \Psi_m. \quad (10)$$

Для расчета магнитных полей ТГ в обмотке ротора задается ток возбуждения I_f и симметричная структура фазных токов обмотки статора:

$$i_A = I_m \cos(\omega t + \beta); \quad i_B = I_m \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \beta); \\ i_C = I_m \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \beta), \quad (11)$$

где $I_m = \sqrt{2} I_s$ – амплитудное и I_s – действующее значения фазного тока; β – упоминавшаяся начальная фаза.

Фазовые соотношения электромагнитных величин в ТГ иллюстрирует векторная диаграмма (рис. 2). Она построена априори на основе проведенных далее расчетов для пояснения сути выполняемых действий.

Итак, в контексте поставленной задачи, перед расчетом магнитного поля в режиме нагрузки известен конкретный заданный набор упомянутых выходных параметров ТГ: $U_s, I_s, \cos \varphi_s$. В данной работе для числовых иллюстраций будем использовать уже приведенные их номинальные значения.

На рис. 2 вектор \underline{I}_s направлен под углом β по отношению к оси отсчета d , аналогичной продольной оси на рис. 1. На отдельном фрагменте диаграммы вектор напряжения \underline{U}_s проведен под углом φ_s относительно тока \underline{I}_s . Векторы падений напряжения $\underline{U}_R = R_s \underline{I}_s$ и $\underline{U}_v = jX_v \underline{I}_s$ проводим относительно тока по известным правилам, считая определенными по обычной методике [8] активное сопротивление R_s фазной обмотки и индуктивное сопротивление X_v от потока ее лобового рассеяния.

Тогда получим фазную ЭДС

$$\underline{E}_l = \underline{U}_s + \underline{U}_R + \underline{U}_v, \quad (12)$$

которую должно обеспечить результирующее магнитное поле ТГ в режиме нагрузки на его активной длине. Из геометрических соотношений (рис. 2) активная и реактивная составляющие этой ЭДС:

$$E_{l,a} = U_s \cos \varphi_s + U_R; \quad E_{l,r} = U_s \sin \varphi_s + U_v, \quad (13)$$

а в итоге – действующее значение и фазовый сдвиг \underline{E}_l относительно вектора \underline{I}_s :

$$E_l = \sqrt{E_{l,a}^2 + E_{l,r}^2}; \quad \varphi_l = \arctg \left(\frac{E_{l,r}}{E_{l,a}} \right). \quad (14)$$

При $U_s=9093$ В; $I_s=8625$ А, $\cos \varphi_s=0,85$; $U_R=11$ В и $U_v=362$ В было получено $\varphi_s=31,79^\circ$; $E_{l,a}=7740$ В; $E_{l,r}=5152$ В; $E_l=9298$ В; $\varphi_l=33,65^\circ$.

Дальше можно использовать основную диаграмму на рис.2, на которой используются векторы ЭДС и МПС, определяемые по магнитному полю в пределах активной длины ТГ.

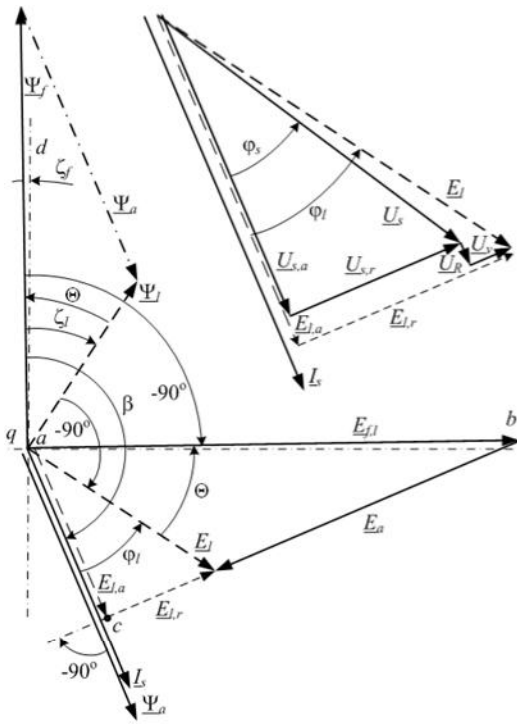


Рис. 2. Совмещенная векторная диаграмма режимов холостого хода и возбуждения от обмотки статора

Исходные значения параметров возбуждения для расчета магнитного поля в режиме нагрузки ТГ. Первое приближение тока возбуждения $I_{f,l}$ и начальной фазы β токов статора (11) для расчета магнитного поля в режиме нагрузки основывается на раздельных расчетах магнитных полей обмотки возбуждения и трехфазной обмотки статора. При этом насыщение магнитной системы (распределение АМП μ) желательно приблизить к тому, что соответствует еще не рассчитанному режиму нагрузки. Насыщение магнитопровода ТГ в этом режиме предопределяется МПС Ψ_l (рис. 2), а ему соответствует ЭДС E_l (14).

В режиме холостого хода (ХХ) магнитное поле рассчитывается многократно при пошаговом изменении тока возбуждения I_f . Пример картины поля дан на рис.1. Каждый раз, начиная от (5) и в итоге по (10), определяется фазная ЭДС E , которую в данном случае обозначим как $E_{f,o}$. В итоге надо получить и далее использовать ток обмотки ротора $I_{f,o}$, при котором ЭДС $E_{f,o}$ сравняется с уже определенной ЭДС E_l (14). При этом еще определяется из (8) начальная фаза ζ МПС Ψ_f – ее обозначим как ζ_f .

Расчетами магнитного поля в режиме ХХ при $E_{f,o}=E_f=9298$ В получено $I_{f,o}=745$ А или $k_f=1,021$ – кратность тока возбуждения I_f по сравнению с его значением $I_{f,o,N}$, дающим в режиме ХХ номинальное напряжение $U_{s,N}$, т.е. $k_f=I_f/I_{f,o,N}$. А еще оказалось, что $\zeta_f=0,9^\circ$.

С такой начальной фазой ζ_f на рис.2 проведен соответствующий режиму ХХ вектор МПС Ψ_f (отсчет от вертикальной оси d). Отличие ζ_f от нуля вызвано некоторой геометрической несимметрией двухслойной укороченной обмотки статора ТГ (см. [5]).

Вторым этапом подготовки является расчет магнитного поля обмотки статора с заданием фазных токов по (11). При этом принимается начальная фаза

$\beta=0$ и при $t=0$ получается структура магнитного поля, ориентированного по продольной оси d (рис. 3). На этой основе по той же методике с конечной формулой (10) определяется ЭДС E , которую теперь обозначим как $E_{a,o}$. Серией расчетов магнитного поля, как и в режиме ХХ, следует подобрать такой ток обмотки статора $I_{s,o}$, при котором $E_{a,o}$ будет равна той же ЭДС E_l (14). Это будет обеспечивать такое же примерно насыщение магнитопровода, как и в режиме ХХ, и ориентировочно такое же, как затем в режиме нагрузки при такой же ЭДС E_l .

Полученные данные позволяют определить ЭДС реакции якоря при заданном токе статора I_s :

$$E_a = E_{a,o} \frac{I_s}{I_{s,o}} \quad (15)$$

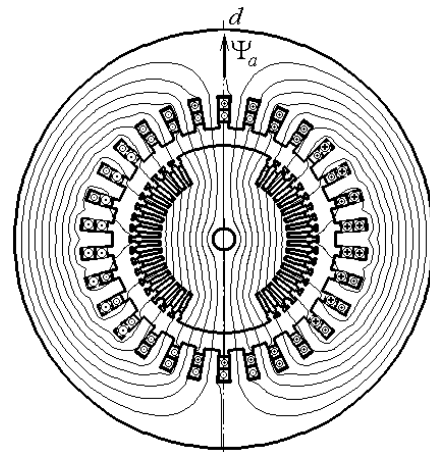


Рис. 3. Картина магнитного поля 3-х фазной обмотки статора ТГ при номинальном токе ($A_{max}=0,7326$ Вб/м)

Быстрее определить E_a можно однократным расчетом магнитного поля обмотки статора при заданном ее токе I_s при $\beta=0$ и $t=0$ на фоне того распределения АМП μ (фактически – насыщения магнитопровода), которое получено при обусловленном расчете магнитного поля в режиме ХХ (АМП уже не изменяется в процессе расчета поля). Тогда, по формуле (10) после расчета магнитного поля сразу получится фазная ЭДС E_a , вместо долгого движения к формуле (15).

Так при $I_s=8625$ А ($I_m=12198$ А), $\beta=0$ и $t=0$ после расчета магнитного поля обмотки статора при $i_A=i_m=12198$ А; $i_B=i_C=-0,5I_m=-6099$ А (рис. 3) на фоне распределения АМП из режима ХХ получили $E_a=15470$ В.

Вектор МПС реакции якоря Ψ_a на рис. 2 проводится параллельно вектору тока I_s , а вектор ЭДС E_a , согласно теории, перпендикулярно им.

Вектор $E_{f,l}$ соответствует фазной ЭДС в режиме нагрузки, вызванной непосредственно МПС Ψ_f , поэтому вектор $E_{f,l}$ отстает от вектора Ψ_f на 90° . В режиме нагрузки имеет место баланс

$$\underline{E}_{f,l} = \underline{E}_l - \underline{E}_a, \quad (16)$$

поэтому эти векторы образуют конкретный треугольник, а на его основе и на базе вектора тока I_s получается прямоугольный треугольник abc .

Из него геометрически определяется с учетом (13) и действующее значение этой ЭДС:

$$E_{f,l} = \sqrt{E_{l,a}^2 + (E_a + E_{l,r})^2}. \quad (17)$$

Вектор результирующего МПС в режиме нагрузки $\Psi_f = \Psi_f + \Psi_a$. Связанная пара векторов Ψ_f и E_f взаимно перпендикулярна согласно теории. Поэтому треугольник векторов Ψ_f , Ψ_f и Ψ_a подобен треугольнику векторов E_a , $E_{f,l}$ и E_f . В них имеет место угол нагрузки, определяемый из совокупности треугольника abc и треугольника этих ЭДС:

$$\Theta = \arctg \frac{E_a + E_{l,r}}{E_{l,a}} - \varphi_l. \quad (18)$$

Как было обусловлено, в режиме нагрузки будет присутствовать примерно такое же насыщение магнитопровода, как и в расчетном режиме ХХ при токе $I_{f,o}$ ввиду одинаковых значений ЭДС $E_{f,o}$ и E_f . Поэтому для рассматриваемого конкретного режима нагрузки из прямой пропорции найдется первое приближение тока возбуждения, обеспечивающего ЭДС $E_{f,l}$:

$$I_{f,l} = I_{f,o} \frac{E_{f,l}}{E_{f,o}}. \quad (19)$$

Из угловых соотношений на рис. 2 с учетом направлений (и знаков) углов определяется искомым углом – первое приближение начальной фазы фазного тока обмотки статора:

$$\beta = -(\varphi_l + \Theta + 90^\circ - \zeta_f). \quad (20)$$

Продолжение расчетов по новой серии формул (17)–(20) дало: $E_{f,l} = 22027$ В; $\Theta = 35,78^\circ$; $I_{f,l} = 1764,9$ А или $k_f = 2,4187$; $\beta = -158,53^\circ$.

Исходный расчет магнитного поля в режиме нагрузки. Полученных данных достаточно, чтобы задать конкретные токи в фазных обмотках статора (11) при $t=0$ ($i_A = -11351$ А; $i_B = 1809$ А; $i_C = 9542$ А) и в обмотке возбуждения $I_{f,l} = 1764,9$ А и провести расчет магнитного поля в режиме нагрузки.

И теперь важно выяснить, насколько это магнитное поле соответствует или нет заданным выходным параметрам ТГ: U_s , I_s и $\cos \varphi_s$.

Для этого после расчета поля по распределению ВМП получили угловую функцию МПС (5), соответствующую теперь режиму нагрузки. Через эту функцию определяются по (7), (8) начальная фаза МПС ζ и по (10) ЭДС E , которые для этого режима обозначаются как ζ_l и E_l . Получилось $\zeta_l = -34,26^\circ$ и $E_l = 8767$ В.

Из векторной диаграммы (рис. 2) находится и фазовый сдвиг между ЭДС E_l и током I_s

$$\varphi_l = -(\beta + 90^\circ - \zeta_l), \quad (21)$$

где значения β и ζ_l , естественно, берутся со своими знаками, в данном случае – отрицательными.

Конкретно получено $\varphi_l = 34,27^\circ$.

Из геометрических соотношений на фрагменте векторной диаграммы (рис. 2) активная и реактивная составляющие напряжения U_s , его действующее значение и фазовый сдвиг относительно вектора тока I_s :

$$\begin{aligned} U_{s,a} &= E_{l,a} - U_R = E_l \cos \varphi_l - R_s I_s; \\ U_{s,r} &= E_{l,r} - U_v = E_l \sin \varphi_l - X_v I_s; \end{aligned} \quad (22)$$

$$U_s = \sqrt{U_{s,a}^2 + U_{s,r}^2}; \quad \varphi_s = \arctg(U_{s,r}/U_{s,a}). \quad (23)$$

Числовые расчеты по (22), (23) дали $U_s = 8559$ В;

$\varphi_s = 32,31^\circ$, а по (1) $P_a = 187185$ кВт. По сравнению с заданными значениями погрешности для этих величин составили 5,87; 1,64 и 6,41 %, соответственно.

Это произошло из-за изменения насыщения магнитопровода, которое все-таки отличается от тех вариантов, которые получались при отдельных расчетах полей обмотки возбуждения и обмотки статора. Ведь структура магнитных полей в разных режимах ТГ оказывается разной (рис. 1, рис. 3 и рис. 4) и при отдельных расчетах выходили на $E_f = 9298$ В, а в режиме нагрузки только на $E_f = 8767$ В.

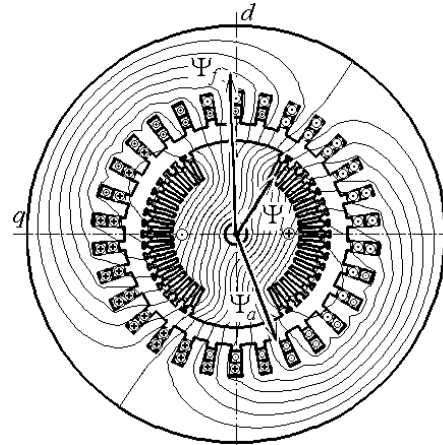


Рис. 4. Направления токов в обмотках и их МПС при номинальной нагрузке ТГ ($A_{max} = 0,5650$ Вб/м)

Итерационный процесс расчета магнитного поля в режиме нагрузки. Чтобы удовлетворить исходным данным ТГ (U_s , I_s , $\cos \varphi_s$) в режиме нагрузки, можно в принципе подобрать соответствующие значения тока обмотки ротора $I_{f,l}$ и угла β для задания мгновенных значений токов (11) в обмотке статора. Простейшим вариантом этого может быть метод последовательных приближений на основе интуиции расчетчика и взаимного соответствия величин на векторной диаграмме по рис. 2. Этому соответствует итерационный процесс, который иллюстрируется блок-схемой на рис. 5.

Здесь блок 1 символизирует заданные значения расчетного режима нагрузки, блок 2 – найденные по (14) значения, блок 3 – первые приближения тока возбуждения $I_{f,l,0}$ по (19) и начальной фазы β_0 по (20); блок 4 – проводимый численный расчет магнитного поля в режиме нагрузки, при котором, как известно, определяются конкретные распределения ВМП A_z и АМП μ (2) в используемой области (рис. 4).

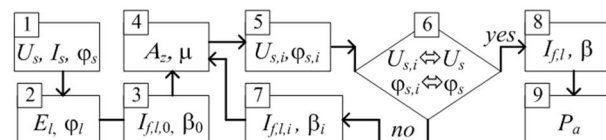


Рис. 5. Схема итерационного процесса расчета магнитного поля в режиме нагрузки ТГ

После расчета магнитного поля по распределению ВМП получается угловая функция МПС (5) и последующим набором действий вплоть до формул (23) определяются напряжение U_s и фазовый сдвиг φ_s .

Их обозначения $U_{s,i}$ и $\varphi_{s,i}$ в блоке 5 соответствуют номеру итерации i .

В блоке 6 полученные значения $U_{s,i}$ и $\varphi_{s,i}$ сравниваются с исходными данными из блока 1. Если бы они совпали с заданной точностью (*yes*), то расчет был бы окончен и последние значения $I_{f,i}$ и β_i были бы признаны окончательными для $I_{f,l}$ и β с выходом в блок 8. Соответственно и последний расчет магнитного поля в режиме нагрузки соответствовал бы заданным значениям I_s , U_s , φ_s и P_d (блок 9).

При получении отрицательного ответа в блоке 6 (*no*) необходимо в блоке 7 задать новые значения $I_{f,i}$ и β_i и далее "крутиться" в цикле блоков 4, 5, 6 и 7, пока не будет обеспечен выход в блоки 8 и 9.

Опыт расчетов ТГ показал, что для достаточно точного удовлетворения расчетному режиму число итераций может исчисляться десятками. Сложность в том, что два варьируемых параметра $I_{f,l}$ и β поразному влияют на два результирующих параметра U_s и φ_s . Решением проблемы итерационного процесса стал следующий разработанный алгоритм.

Алгоритм эффективного поиска параметров возбуждения магнитного поля в режиме нагрузки. Во избежание длительного итерационного процесса поиска необходимых значений $I_{f,l}$ и β , разработан алгоритм решения этой четырехпараметрической задачи. Для упрощения текста в его представлении переобозначим $x=\beta$, $y=I_{f,l}$ и введем условную координатную плоскость x, y , представленную на рис. 6.

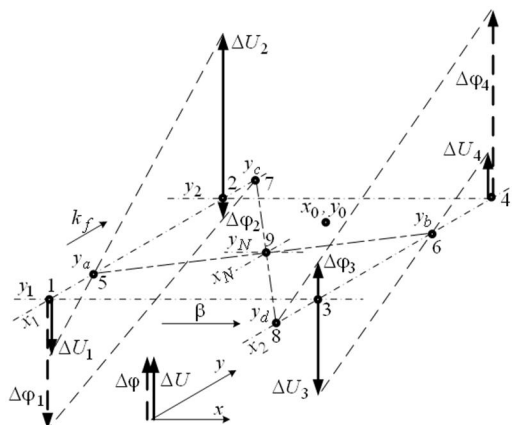


Рис. 6. Модель для поиска параметров возбуждения магнитного поля в режиме нагрузки ТГ

Первое приближение значений $I_{f,l}$ и β обозначим как x_0 и y_0 – они находятся по приведенной выше методике, завершающейся формулами (19), (20). Тогда в окрестности точки с координатами x_0, y_0 возьмем координатный прямоугольник с углами 1, 2, 3, 4. Стороны 1-2 и 3-4 имеют, соответственно, фиксированные координаты x_1 и x_2 , стороны 1-3 и 2-4 – y_1 и y_2 . Заметим, что точка x_0, y_0 не обязательно должна находиться в выделенном прямоугольнике, но отличие x_1 и x_2 от x_0 , как и y_1 и y_2 от y_0 должны быть относительно невелики.

Для четырех пар значения возбуждающих факторов $I_{f,l}$ и β , то есть при

$$x_i, y_j; i = 1; 2, j = 1; 2, \quad (24)$$

проводится расчет магнитного поля в режиме нагрузки и по известной методике извлекается четыре пары значений фазного напряжения U_s и фазового сдвига φ_s (23) в четырех обозначенных точках, т.е. $U_{s,k}, \varphi_{s,k}$, где $k=1, 2, 3, 4$.

Для большей наглядности далее лучше пользоваться не самими значениями $U_{s,k}$ и $\varphi_{s,k}$, а их откликом от заданных значений U_s и φ_s , т.е.

$$\Delta U_k = U_{s,k} - U_s; \Delta \varphi_k = \varphi_{s,k} - \varphi_s, k = 1; 2; 3; 4. \quad (25)$$

Эти величины графически представлены на рис.6 векторами, перпендикулярными плоскости x, y , направление которых зависит от знака их значений.

В наиболее простой форме следующие выражения получаются на основе допущения, что в пределах координатного прямоугольника 1-2-3-4 и его окрестностях зависимости $U_s(x, y)$ и $\varphi_s(x, y)$ близки к линейным, что естественно ввиду принятого малого диапазона значений координат его углов (24).

Соединив концы векторов ΔU_1 и ΔU_2 , на пересечении с координатной линией x_1 находим точку 5, где отклонение U_s от заданного значения равно нулю. Из уравнения прямой линии y -координата точки 5:

$$y_a = y_1 - \Delta U_1 \frac{y_2 - y_1}{\Delta U_2 - \Delta U_1}. \quad (26)$$

Аналогично, после соединения концов векторов ΔU_3 и ΔU_4 , на пересечении с координатной линией x_2 находим y -координату точки 6:

$$y_b = y_1 - \Delta U_3 \frac{y_2 - y_1}{\Delta U_4 - \Delta U_3}. \quad (27)$$

Имея координаты точек 5 и 6, находим уравнение прямой, соединяющей их:

$$y = y_a + \frac{y_b - y_a}{x_2 - x_1} (x - x_1). \quad (28)$$

Все то же, что для функции $U_s(x, y)$, делаем и для функции $\varphi_s(x, y)$ и находим координаты точек 7 и 8:

$$y_c = y_1 - \Delta \varphi_1 \frac{y_2 - y_1}{\Delta \varphi_2 - \Delta \varphi_1} \quad (29);$$

$$y_d = y_1 - \Delta \varphi_3 \frac{y_2 - y_1}{\Delta \varphi_4 - \Delta \varphi_3}, \quad (30)$$

а также уравнение прямой, соединяющей эти точки:

$$y = y_c + \frac{y_d - y_c}{x_2 - x_1} (x - x_1). \quad (31)$$

На линии 5-6 отклонение U_s равно нулю, на линии 7-8 отклонение φ_s равно нулю, которые соответствуют (25). В точке 9 с координатами x_N и y_N на пересечении этих линий утверждения $\Delta U_9=0$ и $\Delta \varphi_9=0$ выполняются одновременно. Подставив в (28) и (31) координаты этой точки, получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} y_N &= y_a + K_1(x_N - x_1); \\ y_N &= y_c + K_2(x_N - x_1); \end{aligned} \quad (32)$$

где $K_1 = \frac{y_b - y_a}{x_2 - x_1}$; $K_2 = \frac{y_d - y_c}{x_2 - x_1}$.

Решение системы (32) дает координаты точки 9:

$$x_N = x_1 + \frac{y_a - y_c}{K_2 - K_1}; y_N = y_c + K_2(x_N - x_1). \quad (33)$$

Фактически найдены значения $\beta=x_N$ и $I_{fj}=y_N$, которые должны обеспечивать изначально заданные выходные параметры ТГ – U_s и $\cos \varphi_s$.

В решаемой здесь иллюстративной задаче были использованы значения x и y , представленные в табл. 1 (рис. 6 имеет общий смысл и не соответствует этим данным). После четырех расчетов магнитного поля при соответствующих сочетаниях x_1, x_2 и y_1, y_2 получены четыре пары значений отклонений ΔU_k и $\Delta \varphi_k$ от заданных. Эти отклонения, определенные по (25) представлены также в табл. 1.

Таблица 1

Данные расчета в четырех точках

	$x_1 = \beta = -157^\circ$	$x_2 = \beta = -158^\circ$
$y_1 = k_f = 2,4$	$\Delta U_1 = -388 \text{ В}$	$\Delta U_3 = -535 \text{ В}$
	$\Delta \varphi_1 = -2,86^\circ$	$\Delta \varphi_3 = -1,09^\circ$
$y_2 = k_f = 2,5$	$\Delta U_2 = -15 \text{ В}$	$\Delta U_4 = -142 \text{ В}$
	$\Delta \varphi_2 = 0,25^\circ$	$\Delta \varphi_4 = 2,05^\circ$

По данным табл. 1 и формулам (33) конкретно вычислено: $\beta=x_N=-156,865^\circ$ и $k_f=y_N=2,4997$.

Чтобы убедиться в адекватности этих значений, проводится расчет магнитного поля ТГ при них (и, естественно, при токе I_s) и по известной уже методике (23) извлекаются значения $U_s=9094 \text{ В}$, $\varphi_s=31,80^\circ$ и по (1) $P_a=199973 \text{ кВт}$. Теперь погрешности относительно заданных значений составили всего 0,011; 0,031 и 0,0135%, соответственно.

Это говорит о том, что действительно рассчитано магнитное поле в режиме нагрузки, соответствующем заданным выходным данным ТГ. После этого можно "извлекать" целый ряд параметров ТГ, возможная часть которых представлена в [3].

Не исключено, что отклонение от исходно заданных величин может превысить допустимую погрешность (это возможно, если исходная точка x_0, y_0 находилась слишком далеко от искомой точки x_N, y_N). Тогда все надо повторить, но уже координатный прямоугольник (рис. 6 и табл. 1) надо выбирать в окрестностях точки с найденными координатами x_N, y_N .

Как правило, после второй серии расчетов достаточная для ТГ высокая точность определения β и I_{fj} будет гарантирована.

Выводы. Представленная организация численных расчетов магнитного поля в режиме нагрузки турбогенератора позволяет обеспечить заданные его выходные параметры: напряжение, ток и коэффициент мощности. При этом предложенный эффективный алгоритм гарантирует быстро сходящийся детерминированный процесс полевых расчетов, в ходе которых находятся ток возбуждения и временная фаза токов обмотки статора. Этому же способствует показанная численно-полевая подготовка начальных значений этих величин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Erdelyi E.A., Fuchs E.F. Nonlinear Magnetic Field Analysis of dc Machines. Part I: Theoretical Fundamentals. Part II: Application of the improved treatment // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. 1970. PAS-89, N7, p. 1546-1564.

2. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // <http://femm.berlios.de>, 2005.
 3. Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Электротехника і електромеханіка. – 2006. – № 2. – С. 40-46.
 4. Милых В.И., Бадовский В.А. Принципы полнофакторного численно-полевого анализа режима нагрузки турбогенератора // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – № 4. – С. 33-37.
 5. Милых, В.И., Полякова Н.В. Система направлений и фазовых соотношений электромагнитных величин при численных расчетах магнитных полей в турбогенераторе // Электротехника і електромеханіка. – 2011. – № 5. – С. 33-38.
 6. 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.
 7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. – 832 с.
 8. Титов В.В., Хугорецкий Г.М. и др. Турбогенераторы. – Л.: Энергия, 1967. – 895 с.

Bibliography (transliterated): 1. Erdelyi E.A., Fuchs E.F. Nonlinear Magnetic Field Analysis of dc Machines. Part I: Theoretical Fundamentals. Part II: Application of the improved treatment // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. 1970. PAS-89, N7, p. 1546-1564. 2. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // <http://femm.berlios.de/>, 2005. 3. Milyh V.I., Polyakova N.V. Opredelenie `elektromagnitnykh parametrov `elektricheskikh mashin na osnove chislennykh raschetov magnitnykh polej // Elektrotehnika i elektromekhanika. - 2006. - № 2. - S. 40-46. 4. Milyh V.I., Badovskij V.A. Principy polnofaktornogo chislennno-polevogo analiza rezhima nagruzki turbogeneratora // Elektrotehnika i elektromekhanika. - 2009. - № 4. - S. 33-37. 5. Milyh, V.I., Polyakova N.V. Sistema napravlenij i fazovykh sootnoshenij `elektromagnitnykh velichin pri chislennykh raschetah magnitnykh polej v turbogeneratore // Elektrotehnika i elektromekhanika. - 2011. - № 5. - S. 33-38. 6. Milyh V.I., Polyakova N.V. Analiz fazovykh sootnoshenij `elektromagnitnykh velichin v turbogeneratore na osnove chislennykh raschetov magnitnykh polej. // Elektrotehnika i elektromekhanika. - 2003. - № 4. - S. 59-64. 7. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. M.: Nauka, 1973. - 832 s. 8. Titov V.V., Hutoreckij G.M. i dr. Turbogeneratory. - L.: `Energiya, 1967. - 895 s.

Поступила 09.11.2011

Милых Владимир Иванович, д.т.н., проф.,
 Полякова Наталья Владимировна
 Национальный технический университет
 "Харьковский политехнический институт"
 кафедра "Электрические машины"
 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21
 тел. (057) 707-65-14; e-mail: mvikpi@kpi.kharkov.ua

Milykh V.I., Polyakova N.V.

Organization of numerical calculation of turbogenerator magnetic field under load with specified output parameters control.

A turbogenerator magnetic field numerical calculation problem is solved for the turbogenerator load conditions with control of its specified output parameters: voltage, current, and power factor. An efficient algorithm of fast-convergent iterative process to compute excitation current and temporal phase of the stator winding currents is introduced, numerical-field preparation of the initial values of the target parameters shown.

Key words – turbogenerator, magnetic field, numerical calculation, load conditions.