

ЧИСЛЕННО-ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ И РАЗНЫХ ВИДОВ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ В МОЩНОМ ТУРБОГЕНЕРАТОРЕ

Представлены принцип и результаты численно-полевого анализа разных режимов возбуждения и видов реакции якоря турбогенератора. Показаны выбор факторов возбуждения магнитного поля и метод определения на его основе магнитного потокосцепления, ЭДС и фазовых соотношений между ними и токами. Представлены картины магнитных полей во всех режимах, а также дан принцип построения соответствующих векторных диаграмм. Проведенные исследования могут быть основой совершенствования проектирования турбогенераторов и других электрических машин.

Ключевые слова: турбогенератор, численно-полевого анализ, магнитные поля, режимы возбуждения, виды реакции якоря, векторные диаграммы.

ВВЕДЕНИЕ

Принцип действия электрических машин (ЭМ) построен на существовании и взаимодействии магнитных полей (МП) [1, 2]. Поэтому дальнейшее развитие системы изучения, расчета и проектирования ЭМ возможно, прежде всего, на основе совершенствования расчетов именно МП.

В синхронных электрических машинах (СЭМ) и, особенно, в мощных турбогенераторах (ТГ) принято рассматривать ряд режимов возбуждения МП и для них важную роль играет реакция якоря. Соответственно, в теории и проектировании этих машин значительное место отводят анализу и учету этого явления [1, 2]. При этом используются классические подходы, основанные на теории магнитной цепи. Такие подходы связаны с целым рядом допущений и условностей и потому сопряжены не с реалистичными, а с воображаемыми картинами МП. Это не позволяет адекватно учесть взаимодействие МП статора и ротора, насыщение магнитопровода при нагрузке СЭМ и в других сложных для анализа режимах.

С развитием численных методов расчета МП [3, 4], которые применительно к ЭМ практически не имеют серьезных допущений, появилась возможность более детального и всестороннего анализа любых режимов возбуждения и видов реакции якоря СЭМ. В данной работе приводится принцип такого анализа на примере крупного ТГ.

Целью этой работы является численно-полевого анализ разных режимов возбуждения и видов реакции якоря мощного ТГ. При этом внимание сосредотачивается на выборе факторов возбуждения МП, обеспечивающих заданный режим и необходимый вид реакции якоря, на выявлении естественных ограничений при их выборе. Важным является также то, как по рассчитываемым численно МП определить электромагнитные величины (магнитные потокосцепления и ЭДС) и фазовые соотношения между ними и токами. Под факторами возбуждения понимаются токи обмоток ротора и статора и фазовые соотношения между ними, под видом реакции якоря

подразумеваем продольную размагничивающую и подмагничивающую, поперечную и смешанную.

К результатам работы относятся еще полученные реалистичные картины силовых линий МП при разных видах возбуждения и реакции якоря ТГ, а также принцип построения соответствующих векторных диаграмм.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Демонстрация расчетов проводится на трехфазном ТГ, имеющем числа пар полюсов $p=1$ и параллельных ветвей обмотки статора $a_s=2$, зазор 0,1 м; активную длину $l_a=4,55$ м; диаметр ротора 1,075 м; относительное укорочение обмотки статора $4/5$, числа последовательных витков фазной обмотки статора $N_s=10$, обмотки ротора $N_f=180$. Номинальные параметры ТГ: активная мощность $P_N=235$ МВт; фазные напряжения и ток $U_{sN}=9093$ В; $I_{sN}=10135$ А; коэффициент мощности $\cos\varphi_{sN}=0,85$; частота $f=50$ Гц.

Электромагнитная система ТГ представлена на рис. 1. Показаны места расположения фазных зон обмотки статора $A-A'$, $B-B'$ и $C-C'$, а явно структура стержней в пазах дана их затемнением для первой из этих фазных обмоток. Ориентация полярных координат (r, α) и положительных направлений токов в обмотках введена в [5], а здесь показаны направления мгновенных токов в режиме номинальной нагрузки (НН).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ФАЗОВЫХ СООТНОШЕНИЙ В ТГ

Магнитное поле в поперечном сечении ТГ описывается известным дифференциальным уравнением

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

где A_z, J_z – аксиальные составляющие векторного магнитного потенциала (ВМП) и плотности тока; μ – маг-

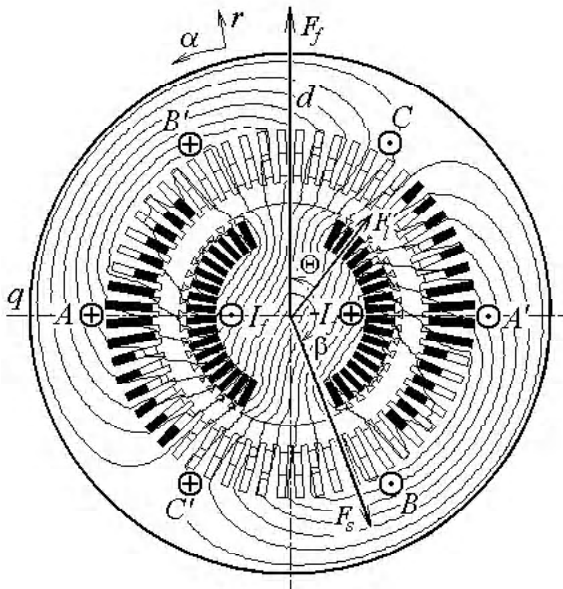


Рис. 1. Электромагнитная система ТГ и магнитное поле в режиме НН ($A_{max} = 0,6352$ Вб/м)

нитная проницаемость; \vec{k} – орт по аксиальной оси z . На границе области расчета – внешней поверхности сердечника статора принималось граничное условие Дирихле $A_z = 0$.

Численные расчеты магнитных полей проводились методом конечных элементов по программе FEMM [3]. Главным результатом расчета магнитного поля являлось распределение ВМП $A_z(r, \alpha)$. Наглядно структуры магнитных полей представлялись картинками силовых линий – по сути это линии равного ВМП $A_{z,*} = const$. Здесь $A_{z,*}$ – относительные значения ВМП, нормированного максимальным во всей области расчета абсолютным значением A_{max} , по которому можно не только качественно, но и количественно сравнивать общий уровень магнитного поля в разных расчетных режимах.

В симметричной трехфазной обмотке статора оперировали с фазной обмоткой $A-A'$ (рис. 1). Ключевой величиной для нее является магнитное потокоцепление (МПС) [4–7], определяемое по найденному распределению ВМП:

$$\Psi_A = N_s I_a \left(\frac{1}{S_A} \sum_{j=1}^{K_A} A_{z,av,j} \Delta S_j - \frac{1}{S_{A'}} \sum_{j=1}^{K_{A'}} A_{z,av,j} \Delta S_j \right), \quad (2)$$

где $S_A, S_{A'}$ – площади сечения по всем токонесящим элементам фазных зон A и A' ; $K_A, K_{A'}$ – числа конечных элементов их дискретизации; $A_{z,av,j}$ – среднее значение ВМП в j -том элементе площадью ΔS_j .

Структура магнитного поля конкретного расчетного режима предопределяется соотношением тока обмотки ротора I_f и симметричной системы фазных токов обмотки статора, приходящихся на параллельные ветви и соответствующие стержни в пазах:

$$\begin{aligned} i_{A,a} &= \frac{I_m}{a_s} \cos(\omega t + \beta); \\ i_{B,a} &= \frac{I_m}{a_s} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \beta); \\ i_{C,a} &= \frac{I_m}{a_s} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \beta), \end{aligned} \quad (3)$$

где $I_m = \sqrt{2} I_s$ – амплитуда, I_s – действующее значения фазного тока; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; t – время; β – начальная фаза, предопределяющая направление действия МДС обмотки статора F_s по отношению к продольной оси ротора d , по которой действует МДС обмотки возбуждения F_f , что показано на рис. 1 (при расчетах задавались мгновенные значения фазных токов при $t = 0$).

Основой выявления фазовых соотношений электромагнитных величин в ТГ является разложение угловой функции МПС фазной обмотки статора $\Psi(\alpha)$ в ряд Фурье [5, 8]. С этой целью после расчета магнитного поля его структура (рис. 1) фиксируется, а, значит, является фиксированным распределение ВМП. Тогда остается «собрать» МПС фазной обмотки $A-A'$ по формуле (2), задавая ее условные позиции со сдвигом на зубцовое деление $\Delta\alpha$, как это было представлено в [5, 7]. С учетом периодичной структуры магнитного поля ТГ число таких позиций K должно быть таким, чтобы пройти полюсное деление, т.е. в условиях рассматриваемого ТГ $K=30$.

В каждой позиции по формуле (2) производится определение МПС Ψ_A и таким способом для фазной обмотки статора получается в численной форме угловая функция МПС на половине ее периода

$$\Psi_k(\alpha_k); \alpha_k = (k-1) \cdot \Delta\alpha; k = 1, 2, 3, \dots K. \quad (4)$$

Полученная дискретная численная угловая функция (4) раскладывается в гармонический ряд Фурье [5, 8]:

$$\Psi = \sum_{v=1,3,5,\dots}^K \Psi_{m,v} \cos(v\alpha + \zeta_v). \quad (5)$$

При вращении магнитного поля угловая позиция фазной обмотки относительно магнитного поля изменяется и тогда с учетом

$$\alpha = \frac{\omega}{p} \cdot t \quad (6)$$

функция МПС (5) становится временной. Тогда на основе закона электромагнитной индукции имеем гармони-

ческий ряд временной функции фазной ЭДС

$$e_A = \omega \sum_{v=1,3,5,\dots}^K v \Psi_{m,v} \cos \left(v\omega t + \zeta_v - \frac{\pi}{2} \right). \quad (7)$$

Дальше оперируем, как принято и в [1], только с первыми гармониками МПС и ЭДС (действительно, более высокие гармоники, как показано в [6], весьма незначительны). Поэтому в (5) нас интересуют амплитуда $\Psi_{m,1}$ и аргумент ζ_1 (начальная фаза) МПС при $v = 1$. Для упрощения записей далее индекс 1 не пишем, а к Ψ и ζ будем добавлять, при необходимости, индекс соответствия конкретному режиму возбуждения ТГ.

Из (7) действующее значение фазной ЭДС первой гармоники

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega \Psi_m. \quad (8)$$

Систему фазовых соотношений электромагнитных величин в ТГ проиллюстрируем с использованием векторной диаграммы (ВД), представленной на рис. 2, для режима НН, картина магнитного поля для которого дана на рис. 1.

Для упрощения, с целью большей наглядности, в данной работе пренебрегаем активным сопротивлением обмотки статора, что для мощного ТГ вполне естественно [1, 2], а также лобовым рассеянием магнитного поля. Фактически мы ограничиваемся процессами на активной длине ТГ. Именно на активной длине ТГ учитывается реакция якоря, а все остальные составляющие МПС и соответствующие ЭДС в активной части будут автоматически учтены благодаря оперированию с единым магнитным полем ТГ и полным МПС фазной обмотки (2).

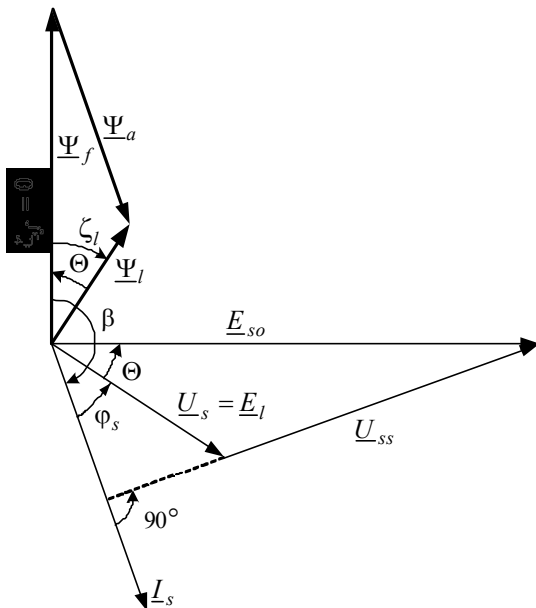


Рис. 2. Векторная диаграмма ТГ для режима номинальной нагрузки

При необходимости лобовое рассеяние и активное сопротивление обмотки статора могут быть учтены на основе полнофакторной расчетной модели ТГ, представленной в [7].

На ВД (рис. 2) показаны векторы: МПС фазной обмотки: Ψ_f – обусловлено полем обмотки ротора; Ψ_a – обусловлено полем трехфазной обмотки статора (реакции якоря); Ψ_l – результирующее МПС от единого поля ТГ; $\underline{U}_s, \underline{I}_s$ – фазные напряжение и ток; \underline{E}_{so} – фазная ЭДС, вызванная МПС Ψ_f ; \underline{U}_{ss} – падение напряжения от действия реакции якоря (фактически $\underline{U}_{ss} = -E_{ss}$, где \underline{E}_{ss} – синхронная ЭДС, вызванная МПС Ψ_a). Из уравнений электромагнитных величин ТГ [1] в условиях принятых допущений следует, что $\Psi_l = \Psi_f + \Psi_a$.

Представим взаимосвязь векторов на ВД, вытекающую из численного расчета магнитного поля. Исходя из соответствия ориентации пространственных векторов и условий вращающихся векторов, принятого в [5], вектор Ψ_f ориентирован по продольной оси ротора d , как и МДС обмотки ротора \underline{F}_f на рис. 1, а на рис. 2 этот вектор становится базовым с нулевой начальной фазой $\zeta_f = 0$, следовательно, от него ведется отсчет прочих начальных фаз.

По методике из [7] для НН определено, что номинальные напряжение, коэффициент мощности и активная мощность достигаются при $I_f = 2030,5$ А и $\beta = -159,04^\circ$. Именно под углом β проведен вектор \underline{I}_s на рис. 2, а при $I_s = I_{sN}$ мгновенные фазные токи по (3): $i_{A,a} = -6692,3$ А; $i_{B,a} = 1126,5$ А; $i_{C,a} = 5565,5$ А. Это дало их конкретные направления на рис. 1, а баланс токов задал направление МДС обмотки статора \underline{F}_s . После расчета магнитного поля (1) и разложения по (5) на основе числовых значений по (4), для Ψ_l были найдены амплитуда этого МПС для НН $\Psi_l = 40,93$ Вб и начальная фаза $\zeta_l = -37,24^\circ$ – так проведен вектор Ψ_l .

Между векторами МПС Ψ_f и Ψ_l получился фазовый сдвиг – это угол нагрузки [1] $\Theta = \zeta_f - \zeta_l = 37,24^\circ$. Вектор Ψ_a , фактически символизирующий действие реакции якоря, совпадает по фазе с вектором \underline{I}_s . Пока Ψ_f и Ψ_a имели только направления, но их пересечение в построенном на основе $\Psi_l = \Psi_f + \Psi_a$ треугольнике предопределяет их длины, а значит и значения – в масштабе уже известного вектора Ψ_l . Таким образом, в едином магнитном поле режима НН условно выделены составляющие Ψ_f и Ψ_a реально фигурирующего МПС Ψ_l .

Результирующее МПС Ψ_l порождает по (8) результирующую фазную ЭДС E_l (индекс l соответствует режиму нагрузки), которая при принятых допущениях равна фазному напряжению: $U_s = E_l$, а для режима НН при работе на сеть бесконечной мощности они обязаны соответствовать U_{sN} .

Равенство действующих значений распространяется и на равенство векторов этих величин $\underline{U}_s = \underline{E}_l$. Все ЭДС, как и породившие их МПС, связаны соотношением $\underline{E}_l = \underline{E}_{so} + \underline{E}_{ss}$ или $\underline{U}_s = \underline{E}_{so} - \underline{U}_{ss}$ и образуют треугольник, подобный треугольнику векторов $\underline{\Psi}_l$, $\underline{\Psi}_f$ и $\underline{\Psi}_a$. Все ЭДС относительно своих МПС отстают по фазе на 90° , что отражено в (5), (7). Поэтому вектор фазного напряжения \underline{U}_s проводится с начальной фазой $\zeta_U = \zeta_l - 90^\circ$ или, по-другому, $\zeta_U = -\Theta - 90^\circ$. Тогда выявляется фазовый сдвиг $\varphi_s = -\beta - \Theta - 90^\circ$ между \underline{I}_s и \underline{U}_s и при НН получается $\varphi_s = 31,79^\circ$, что соответствует заданному значению $\cos\varphi_{sN}$.

Имея длину ($U_s = 9093$ В) и направления вектора \underline{U}_s , стыкуем с ним вектор \underline{U}_{ss} , который должен быть перпендикулярным \underline{I}_s (это наследует перпендикулярность \underline{E}_{ss} и $\underline{\Psi}_a$), до пресечения с вектором \underline{E}_{so} , который, в свою очередь, перпендикулярен $\underline{\Psi}_f$. В итоге отсечением векторов \underline{U}_{ss} и \underline{E}_{so} получаем их длины, и, тем самым, значения этих ЭДС в масштабе вектора \underline{U}_s .

Определенные величины и фазовые соотношения ЭДС, тока, напряжений и МПС дают основу для получения ряда других величин, например, активной мощности ТГ $P_a = 3U_s I_s \cos\varphi_s$, а также для анализа режимов возбуждения и видов реакции якоря в ТГ. При их анализе базовой величиной является номинальное фазное напряжение U_{sN} , которое при работе на сеть бесконечной мощности не зависит от режимов возбуждения (исключая режим короткого замыкания).

РАСЧЕТНЫЕ РЕЖИМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ТГ И РАЗНЫЕ ВИДЫ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ

Исходным является режим холостого хода (ХХ) при действии только МДС обмотки ротора F_f . Соответствующая ВД дана на рис. 3, картина магнитного поля – на рис. 4. Было определено, что ЭДС E_{so} по (8), равная номинальному напряжению U_{sN} , достигаются при токе возбуждения $I_f = 822$ А.

Индивидуальное магнитное поле трехфазной обмотки статора рассчитано при продольном (рис. 5) и поперечном (рис. 6) действии ее МДС F_s , ВД даны на рис. 7. В первом случае задано $\beta = 0$ и напряжение U_{sN} обеспечивается при фазном токе $I_s = 5671,9$ А, во втором – $\beta = -90^\circ$ и для обеспечения U_{sN} понадобился несколько больший ток $I_s = 5880,8$ А, что свидетельствует о различии магнитных свойств ТГ по продольной d и поперечной q осям.

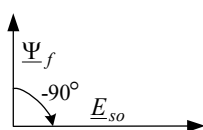


Рис. 3. ВД в режиме ХХ

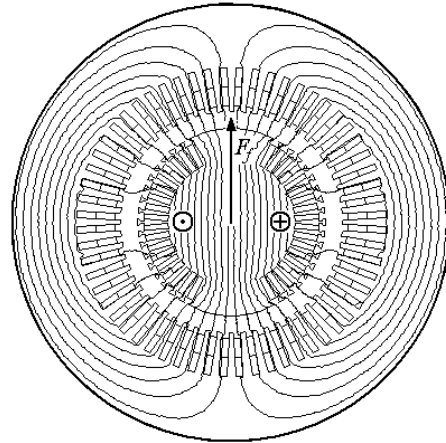


Рис. 4. Поле обмотки ротора при $I_f = 822$ А и $U_s = 9093$ В ($A_{max} = 0,5277$ Вб/м)

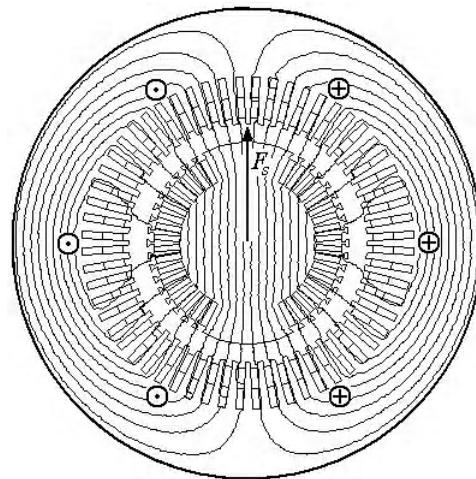


Рис. 5. Магнитное поле обмотки статора по продольной оси при $I_s = 5671,9$ А ($A_{max} = 0,5065$ Вб/м)

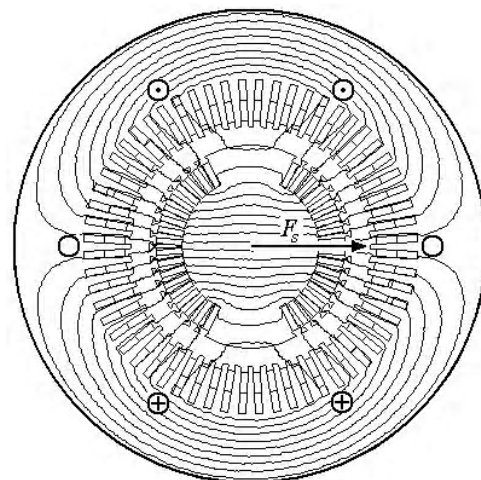


Рис. 6. Магнитное поле обмотки статора по поперечной оси при $I_s = 5880,8$ А ($A_{max} = 0,5040$ Вб/м)

Варианты *совместного действия обмоток ротора и статора* при продольной реакции якоря представлены на рис. 8 и на рис. 9 – подмагничивающая и размагничивающая реакции якоря, которые обеспечиваются заданием в (3) соответствующих углов β : их значения очевидны на ВД (рис. 10). При подмагничивании и размагничивании картины магнитных полей отличаются (рис. 8 и рис. 9), особенно в зазоре.

При *продольной размагничивающей реакции якоря* (рис. 8 и рис. 10, а) можно было использовать номинальный фазный ток $I_{sN} = 10135$ А. При этом для обеспечения U_{sN} понадобился ток возбуждения $I_f = 2310,5$ А, который лишь немного превышает номинальный. На рис. 8 МДС F_s и F_f действуют встречно и результирующая МДС F_l направлена в сторону F_f .

При *продольной подмагничивающей реакции якоря* (рис. 9 и рис. 10, б) токи обмоток не могут превышать значений, указанных в подписях к рис. 4 и рис. 5, а при совместном действии обмоток эти токи должны быть меньше указанных предельных значений, иначе нару-

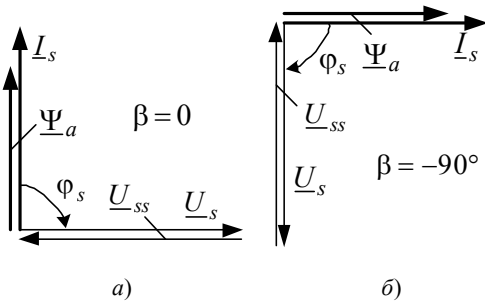


Рис. 7. ВД при продольном – а и поперечном – б поле обмотки статора

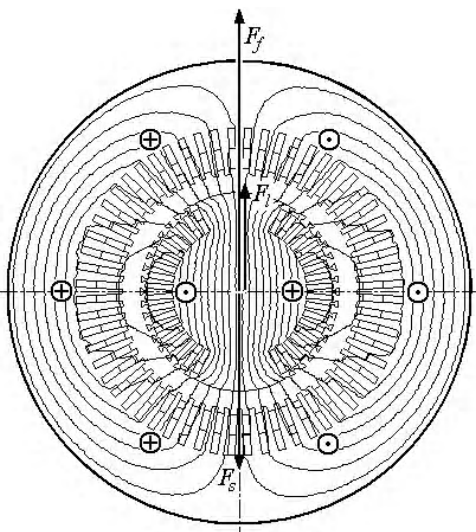


Рис. 8. Магнитное поле при продольной размагничивающей реакции якоря при $I_s = 10135$ А и $I_f = 2310,5$ А ($A_{max} = 0,6497$ Вб/м)

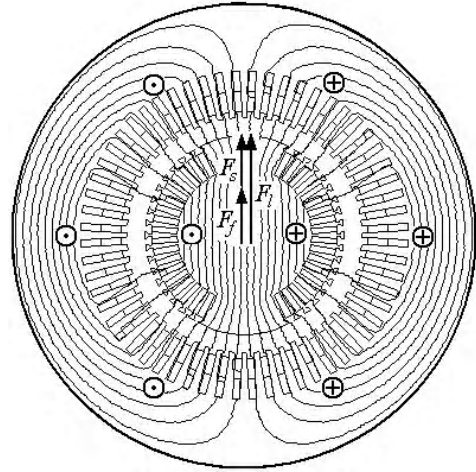


Рис. 9. Магнитное поле при продольной подмагничивающей реакции якоря при $I_s = 5672$ А и $I_f = 411$ А ($A_{max} = 0,4968$ Вб/м)

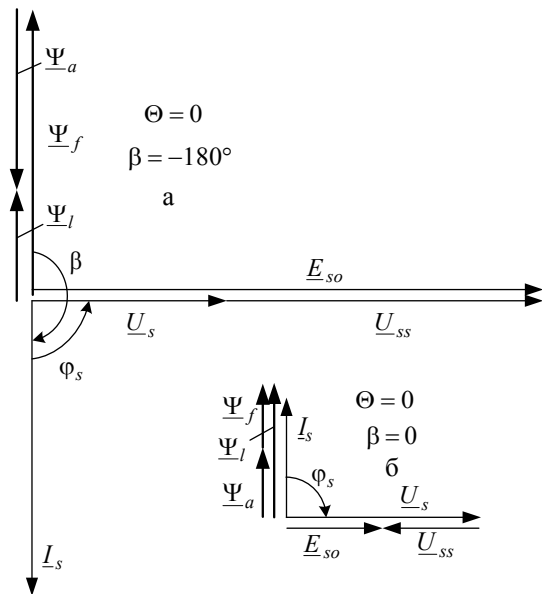


Рис. 10. ВД при продольной реакции якоря размагничивающей и подмагничивающей

шился баланс между ЭДС обмотки статора E_l и напряжением сети U_s , что физически невозможно.

Для примера приняли половинное значение тока возбуждения из режима XX, т. е. $I_f = 411$ А. Тогда фазный ток статора должен быть существенно меньше номинального и для обеспечения U_{sN} понадобилось значение $I_s = 5672$ А.

В случаях продольной реакции якоря $\Theta = 0$, т. е. ТГ не несет активной нагрузки.

Поперечная реакция якоря возможна только при активно-емкостной нагрузке, задается посредством $\beta = -90^\circ$ и зависит от конкретного фазового сдвига φ_s . Магнитные поля и ВД для двух значений φ_s представлены на рис. 11–13.

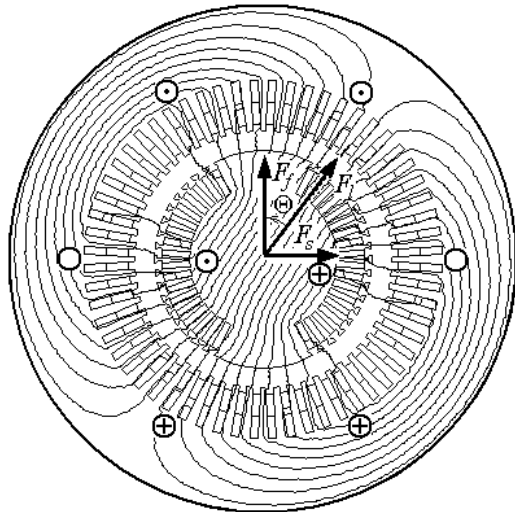


Рис. 11. Магнитное поле при поперечной реакции якоря для варианта $\varphi_s = -36,9^\circ$ при $I_s = 3530,8$ А и $I_f = 655,3$ А ($A_{\max} = 0,5183$ Вб/м)

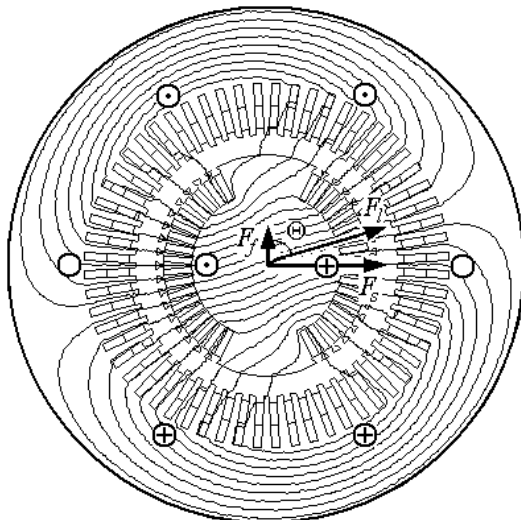


Рис. 12. Магнитное поле при поперечной реакции якоря для варианта $\varphi_s = -73,8^\circ$ при $I_s = 5644,9$ А и $I_f = 229,3$ А ($A_{\max} = 0,5058$ Вб/м)

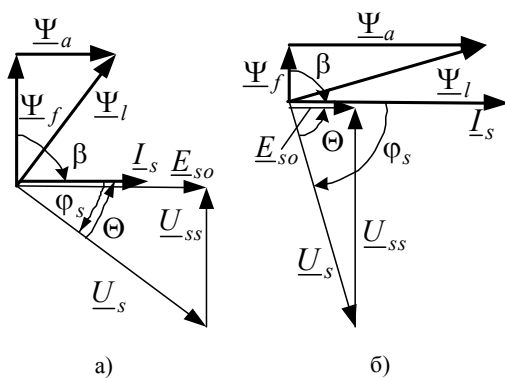


Рис. 13. ВД при поперечной реакции якоря при а) $\varphi_s = -36,9^\circ$ и б) $\varphi_s = -73,8^\circ$

Фазовый сдвиг $\varphi_s = -36,9^\circ$ (при $\cos\varphi_s = 0,8$) и поперечная реакция якоря (рис. 11 и рис. 13, а) обеспечивались при найденном конкретном соотношении токов $I_s = 3530,8$ А и $I_f = 655,3$ А. При этом ТГ способен нести активную мощность лишь $P_a = 77,1$ МВт – существенно меньшую, чем номинальная.

Вариант поперечной реакции при вдвое увеличенном значении φ_s , а именно при $\varphi_s = -73,8^\circ$, был обеспечен при увеличении фазного тока статора до $I_s = 5644,9$ А и соответствующем снижении тока возбуждения до $I_f = 229,3$ А (рис. 12 и рис. 13, б). Активная мощность ТГ снизилась до 42,95 МВт.

При рассмотренных вариантах поперечной реакции якоря угол нагрузки Θ соответствует φ_s ($\varphi_s = -\Theta$). Очевидно, что такая реакция якоря дает увеличение МПС обмотки статора от Ψ_f до Ψ_l (рис. 13).

Рассматриваемый ТГ рассчитан на работу с *продольно-поперечной реакцией якоря*, которая в целом является *размагничивающей*. Этот режим уже был продемонстрирован на рис. 1 и рис. 2 и он соответствует НН ТГ, обеспечивающей его заданные энергетические параметры.

Еще один интересный вариант МП и соответствующей ВД представлен на рис. 14 и рис. 15. Этот вариант соответствует *предельной нагрузке* при $\Theta = 90^\circ$. Такой режим обеспечивает конкретное соотношение: номинальный ток возбуждения $I_f = 2030,5$ А; фазный ток статора $I_s = 15380$ А, существенно превышающий номинальный, и $\beta = -157,15^\circ$. При этом достигается максимальная активная мощность $P_{a\max} = 386,8$ МВт.

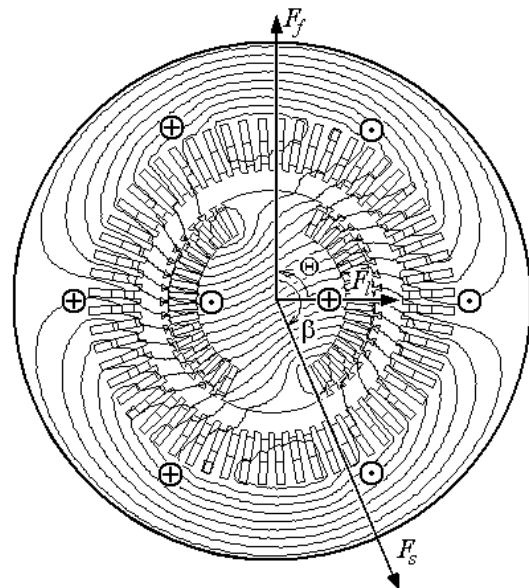


Рис. 14. Режим нагрузки при $\Theta = 90^\circ$; $I_s = 15380$ А, $I_f = 2030,5$ А ($A_{\max} = 0,5495$ Вб/м)

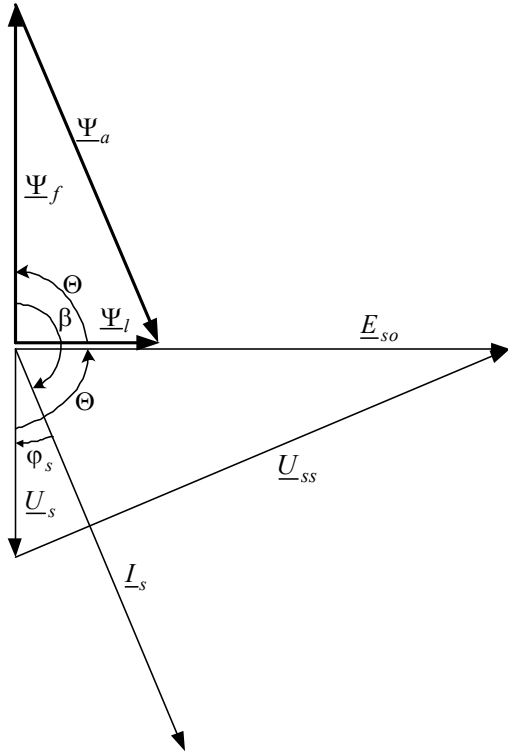


Рис. 15. ВД для предельного режима нагрузки при $\Theta = 90^\circ$

Последним представим еще один режим возбуждения ТГ, соответствующий *установившемуся трехфазному короткому замыканию* (КЗ). В этом случае расчетным критерием является условие $U_s = 0$, а реакция якоря является продольной ($\beta = -180^\circ$) и полностью размагничивающей: результирующее МПС фазной обмотки статора Ψ_l также равно нулю.

Расчет режима КЗ проведен при токе возбуждения, соответствующем режиму ХХ (рис. 4), т. е. $I_f = 822$ А. Для выполнения отмеченных условий был итерационно определен необходимый ток статора $I_s = 5742,3$ А. Соответствующие картина МП и ВД представлены на рис. 16 и рис. 17.

По сравнению со всеми другими режимами, здесь совершенно иная структура магнитного поля: силовые линии проходят через сердечник ротора и замыкаются вдоль зазора и зубцовых структур статора и ротора поперек пазов, хотя есть и другие локальные вихри МП.

В завершение отметим, что на рисунках с картинками магнитных полей векторы МДС для возможности наглядного сравнения выдержаны в едином масштабе.

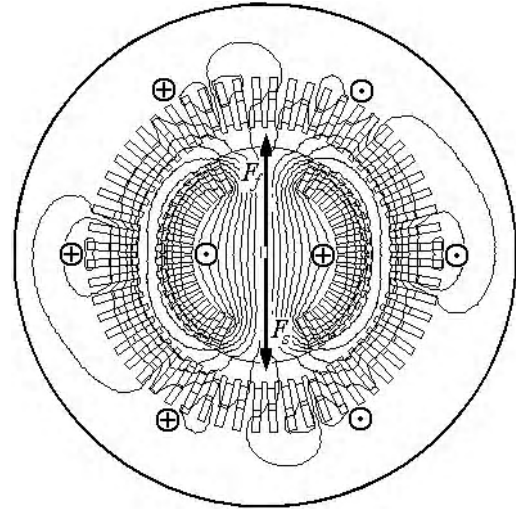


Рис. 16. Магнитное поле в режиме КЗ при $I_s = 5742,3$ А и $I_f = 822$ А ($A_{max} = 0,0718$ Вб/м)

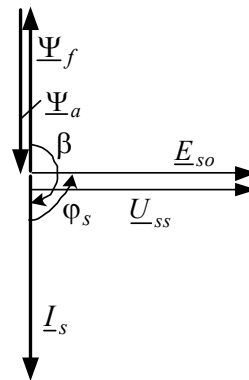


Рис. 17. ВД для режима КЗ

ВЫВОДЫ

1. Численные расчеты МП ТГ являются наиболее адекватным средством получения ключевых электромагнитных величин – МПС и ЭДС фазной обмотки статора, а также фазовых соотношений между ними и токами.

2. Векторные диаграммы, построенные на основе численно-полевых расчетов с учетом насыщения магнитопровода, получают новое наполнение и позволяют в явном виде выделить из единого МП части МПС и ЭДС, обеспечиваемые обмотками статора и ротора.

3. Проведенные расчеты позволили получить картины магнитных полей для практически всех режимов возбуждения турбогенератора и видов реакции якоря, не все из которых воспроизводились классическим подходом на основе теории магнитных цепей. Эти картины могут стать основой для уточнения системы проектирования турбогенераторов и, в принципе, других синхронных электрических машин.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Л. : Энергия, 1978. – 832 с.
2. Титов В. В. Турбогенераторы / В. В. Титов, Г. М. Хуторецкий, Г. А. Загородная и др. – Л. : Энергия, 1967. – 895 с.
3. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // <http://femm.berlios.de>.
4. Милых В. И. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей / В. И. Милых, Н. В. Полякова // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2006. – № 2. – С. 40–46.
5. Милых В. И. Система направлений и фазовых соотношений электромагнитных величин при численных расчетах магнитных полей в турбогенераторе / В. И. Милых, Н. В. Полякова // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2011. – № 5. – С. 33–38.
6. Милых В. И. Гармонический анализ электромагнитных величин трехфазной обмотки статора турбогенератора на основе классических и численно-полевых методов / В. И. Милых, Н. В. Полякова // *Технічна електродинаміка*. – 2013. – № 3. – С. 40–49.
7. Милых В. И. Организация численного расчета магнитного поля турбогенератора в режиме нагрузки с обеспечением заданных его выходных параметров / В. И. Милых, Н. В. Полякова // *Електротехніка і електромеханіка*. – 2012. – № 1. – С. 36–41.
8. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1973. – 832 с.

Стаття надійшла до редакції 29.01.2013.

Мілих В. І.¹, Полякова Н. В.²

¹Д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна

²Асистент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна

ЧИСЕЛЬНО-ПОЛЬОВИЙ АНАЛІЗ РЕЖИМІВ ЗБУДЖЕННЯ І РІЗНИХ ВИДІВ РЕАКЦІЇ ЯКОРЯ В ПОТУЖНОМУ ТУРБОГЕНЕРАТОРІ

Подані принципи і результати чисельно-польового аналізу різних режимів збудження і видів реакції якоря турбогенератора. Показані вибір чинників збудження магнітного поля і метод визначення на його основі магнітного потокозчеплення, ЕРС і фазових співвідношень між ними і струмами. Представлені картини магнітних полів у всіх режимах, а також поданий принцип побудови відповідних векторних діаграм. Виконані дослідження можуть бути основою вдосконалення проектування турбогенераторів і інших електричних машин.

Ключові слова: турбогенератор, чисельно-польовий аналіз, магнітні поля, режими збудження, види реакції якоря, векторні діаграми.

Milykh V. I.¹, Polyakova N. V.²

¹Ph.D., professor, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Ukraine

²Assistant, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Ukraine

THE NUMERICAL FIELD ANALYSIS OF EXCITATION MODES AND OF THE DIFFERENT TYPES OF THE ARMATURE REACTION IN A POWERFUL TURBOGENERATOR

Principle and the numerical field analysis results of the different excitation modes and of the different types of the armature reaction of powerful turbogenerator are presented. A selection of the the magnetic field excitation factors in the idle mode, the rated load and short-circuit, as well as those specific modes that are characterized by longitudinal demagnetizing and magnetizing and more cross-reaction of the armature excitation of the magnetic field only the stator winding along the longitudinal and transverse axes of the rotor is shown. The principle, which allows by the results of the magnetic field calculation in each mode to determine the key electromagnetic values (magnetic flux and EMF) and the phase relationship between them and the currents is considered. The pictures of the magnetic fields are graphically presented in all modes, and the principle of the corresponding vector diagrams construction is also presented on the basis of calculation of these fields. In the original received vector diagrams it is possible to identify qualitatively and quantitatively the share and role of the magnetic field of the rotor and the stator magnetic field. The conducted research can be the basis for improving the system of study, analysis and design of turbogenerators and other electric machines because the considered method of analysis of magnetic fields is quite universal

Keywords: turbogenerator, numerical-field analysis, magnetic fields, modes of excitation, types of the armature reaction, vector diagrams.

REFERENCES

1. Voldek A. I. Elektricheskiye mashiny. Leningrad, Energiya, 1978, 832 p.
2. Titov V.V., Hutoreckij G. M., Zagorodnaja G. A., Vartan'jan G. P., Zaslavskij D. I., Smotrov I. A. Turbogeneratory. Leningrad, Energiya, 1967, 895 p.
3. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Version 4.2. User's Manual, September 26, 2006 // <http://femm.berlios.de>.
4. Milykh V. I., Polyakova N.V. Opredeleniye elektromagnitnykh parametrov elektricheskikh mashin na osnove chislennykh raschetov magnitnykh poley, *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2006, No. 2, pp. 40–46.
5. Milykh V. I., Polyakova N. V. Sistema napravleny i fazovykh sootnosheny elektromagnitnykh velichin pri chislennykh raschetakh magnitnykh poley v turbogeneratore, *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2011, No. 5, pp. 33–38.
6. Milykh V. I., Polyakova N. V. Garmonichesky analiz elektromagnitnykh velichin trekhfaznoy obmotki statora turbogeneratora na osnove klassicheskikh i chislennopolevykh metodov. *Tekhnichna elektrodinamika*, 2013, No. 3, pp. 40–49.
7. Milykh V. I., Polyakova N. V. Organizatsiya chislennogo rascheta magnitnogo polya turbogeneratora v rezhime nagruzki s obespecheniyem zadannykh ego vykhodnykh parametrov, *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2012, No. 1, pp. 36–41.
8. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. Moscow, Nauka, 1973, 832 p.