

ЭНЕРГЕТИКА

Ю. М. ШАХНАЗАРЯН

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МОЩНОСТЬ ГИДРОГЕНЕРАТОРА
 В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

При переходном асинхронном режиме генератора, когда изменение скольжения происходит с достаточно большой скоростью, процесс изменения токов в генераторе, связанный с изменением накопленной энергии магнитных полей контуров машины, может значительно отстать от изменения скольжения.

Это отставание тем заметнее, чем больше постоянная времени контуров машины и чем больше скорость изменения скольжения. При этом электромагнитная мощность генератора, найденная с учетом изменения скольжения и называемая динамической, будет заметно отличаться от статической. Исследование таких режимов, как синхронизация, ресинхронизация, качания и т. п. на физических и математических моделях следует вести с использованием реальных динамических характеристик мощности. Исключение могут составлять случаи, когда асинхронная мощность мала. Такие режимы, обычно, исследуются в предположении, движения ротора с постоянным ускорением

$$\delta(t) = \delta_0 - s_0 t + at^2, \quad (1)$$

где $\delta(t)$ — относительный угол, изменяемый при рассматриваемых режимах по сложному закону; δ_0 — начальное его значение; $a = \frac{1}{2} \frac{d^2 \delta}{dt^2}$ — ускорение; s_0 — начальное скольжение; t — время.

Рассмотрим асинхронный режим генератора, связанный с шинами неизменного напряжения, через сложную линейную связь (рис. 1). Дадим краткий анализ влияния ускорения движения ротора на электромагнитную мощность генератора.

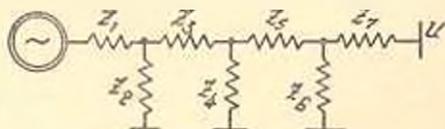


Рис. 1. Рассматриваемая схема передачи.

При выводе формулы были приняты следующие основные допущения:

а) активное сопротивление и переходные процессы в статоре генератора не учитывались;

б) эквивалентная машина считалась симметричной. Использовался известный прием замены явнополюсной машины эквивалентной неявнополюсной.

Электромагнитная мощность считалась положительной, когда она отдавалась в сеть. Скольжение положительно при скорости вращения ротора ниже синхронной. В целях упрощения формула мощности выведена для невозбужденной машины.

Электромагнитную мощность можно выразить следующей формулой:

$$\begin{aligned}
 P_E = & - \frac{U^2}{2Z_{12}^2} \frac{x_d - x_q}{\left(1 + \frac{x_d - x_q}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right) \left(1 - \frac{x_d - x_q}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right)} \left[L'_{ds} + \right. \\
 & \left. + V \sqrt{(1 - L'_{dc})^2 + L'^2_{ds}} \sin \left(2\delta - 2\alpha_{12} - \arctg \frac{L'_{ds}}{1 - L'_{dc}}\right) \right] - \\
 & - \frac{U^2}{2Z_{12}^2} \frac{x_d - x_q}{\left(1 - \frac{x_d - x_q}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right) \left(1 + \frac{x_d - x_q}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right)} \left[L'_{ds} + \right. \\
 & \left. + V \sqrt{(1 - L'_{dc})^2 + L'^2_{ds}} \sin \left(2\delta - 2\alpha_{12} - \arctg \frac{L'_{ds}}{1 - L'_{dc}}\right) \right] - \\
 & - \frac{U^2}{2Z_{12}^2} \frac{x_q - x_q}{1 - \frac{x_q - x_q}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}} \left[L'_{qs} - \right. \\
 & \left. - V \sqrt{(1 - L'_{qc})^2 + L'^2_{qs}} \sin \left(2\delta - 2\alpha_{12} - \arctg \frac{L'_{qs}}{1 - L'_{qc}}\right) \right] + \\
 & + \frac{U^2}{2Z_{11} Z_{12}^2} \left[\frac{x_d - x_d}{\left(1 + \frac{x_d - x_q}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right) \left(1 - \frac{x_d - x_d}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right)} \right]^2 \times \quad (2) \\
 & \times \left[(1 - L'_{dc})^2 + L'^2_{ds} \right] \sin \alpha_{11} \left[1 + \cos 2 \left(\delta - \alpha_{12} - \arctg \frac{L'_{ds}}{1 - L'_{dc}} \right) \right] + \\
 & + \frac{U^2}{2Z_{11} Z_{12}^2} \left[\frac{x_d - x_d}{\left(1 - \frac{x_d - x_d}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right) \left(1 - \frac{x_q - x_d}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right)} \right]^2 \times \\
 & \times \left[(1 - L'_{dc})^2 + L'^2_{ds} \right] \sin \alpha_{11} \left[1 + \cos 2 \left(\delta - \alpha_{12} - \arctg \frac{L'_{ds}}{1 - L'_{dc}} \right) \right] + \\
 & + \frac{U^2}{2Z_{11} Z_{12}^2} \left[\frac{x_q - x_q}{\left(1 - \frac{x_q - x_q}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right)} \right]^2 \left[(1 - L'_{qc})^2 + L'^2_{qs} \right] \sin \alpha_{11} \left[1 - \right. \\
 & \left. - \cos 2 \left(\delta - \alpha_{12} - \arctg \frac{L'_{qs}}{1 - L'_{qc}} \right) \right] +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{U^2}{Z_{11}Z_{12}} \times \\
 & \times \frac{(x_d - x_d')(x_d' - x_d) \sqrt{[(1 - L_{dc})^2 + L_{ds}^2][(1 - L_{dc}')^2 + L_{ds}'^2]}}{\left(1 + \frac{x_d - x_d'}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right) \left(1 - \frac{x_d' - x_d}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right)^2 \left(1 - \frac{x_d - x_d'}{Z_{11}} \cos \alpha_{11}\right)} \times \\
 & \times \left[\frac{L_{ds} L_{ds}' + (1 - L_{dc})(1 - L_{dc}')}{\sqrt{[L_{ds}L_{ds}' + (1 - L_{dc})(1 - L_{dc}')]^2 + [L_{ds}(1 - L_{dc}') - L_{ds}'(1 - L_{dc})]^2}} + \right. \\
 & \left. + \cos \left(2\delta - 2\alpha_{12} - \arctg \frac{L_{ds}(1 - L_{dc}') + L_{ds}'(1 - L_{dc})}{(1 - L_{dc})(1 - L_{dc}') - L_{ds}L_{ds}'} \right) \right] \sin \alpha_{11}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где U — напряжение на шинах приемной электрической системы;
 Z_{11}, Z_{12} — собственные и взаимные полные сопротивления;
 α_{11}, α_{12} — соответствующие дополнительные углы этих сопротивлений;
 x_d, x_d' — синхронные индуктивные сопротивления цепи статора по продольной и поперечной осям;
 x_d' — переходное индуктивное сопротивление по продольной оси;
 x_d, x_d' — сверхпереходные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям.

Величины $L_{ds}, L_{ds}', L_{ds}, L_{ds}'$ в составляющей мощности, представляющей собой интегралы типа Френеля

$$L_s = \int_0^{t_s} e^{-s} \sin(s' y + \eta' y^2) dy; \quad (3)$$

$$L_c = \int_0^{t_c} e^{-s} \cos(s' y + \eta' y^2) dy, \quad (4)$$

где $y = \frac{t - \tau}{T}, t_s = \frac{t}{T}, s' = sT, \eta' = aT^2.$

T — постоянная времени контура ротора с учетом параметров генератора и системы.

Решение этих интегралов сводится к табулированным функциям интеграла вероятности от комплексного аргумента [1].

Для придания универсальности динамическим характеристикам, используется параметр η' , аналогично тому, как было принято в [1, 2, 4] при построении универсальных динамических характеристик синхронных и асинхронных машин.

Формула электромагнитной мощности получена на основании известного выражения мощности синхронной машины

$$P = E_d I_q + E_q I_d$$

путем подстановки в это выражение э.д.с. и тока с учетом асинхронного вращения генератора, найденных из общих операторных уравнений синхронной машины, применительно к режимам работы машины с постоянным ускорением. При выводе формулы предполагалось, что отсчет времени производится с момента изменения установившегося режима генератора. Причем, затухающие члены, появляющиеся в уравнении в продолжении мгновенного появления конечного скольжения, практически не оказывающие никакого влияния на среднее значение асинхронной мощности, в формуле опущены.

Последние четыре составляющие электромагнитной мощности в (2) пропорциональны величине $\sin 2\alpha_{11}$ и независимо от знака скольжения всегда положительны. При учете этих составляющих в выражении электромагнитной мощности, как это видно из приведенной рас-

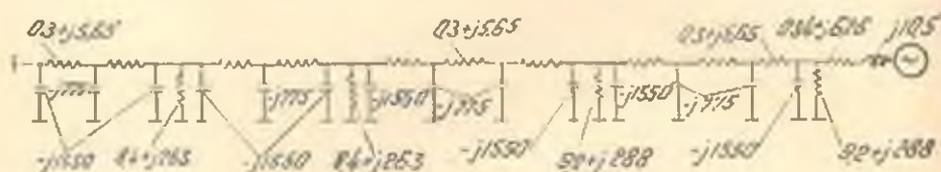


Рис. 2. Расчетная схема передачи. Параметры эквивалентного генератора:

$$x_d = 6,95 \text{ ом}, x'_d = 3,82 \text{ ом}, x_q = 2,08 \text{ ом}, x'_q = 0,784 \text{ ом}, x''_q = 0,648 \text{ ом}, T_{d0} = 5,7 \text{ сек}, \\ T'_{d0} = 0,12 \text{ сек}, T'_{q0} = 0,213 \text{ сек}, K_{\text{транс}} = 1,86, P_{\text{вал}} = 10 \text{ ква}, U_{\text{на}} = 520 \text{ в.}$$

четной кривой рис. 3 характеристики мощности смещаются вверх по оси ординат и тем больше, чем больше величина активного сопротивления линии передачи. Характеристики средних значений статической

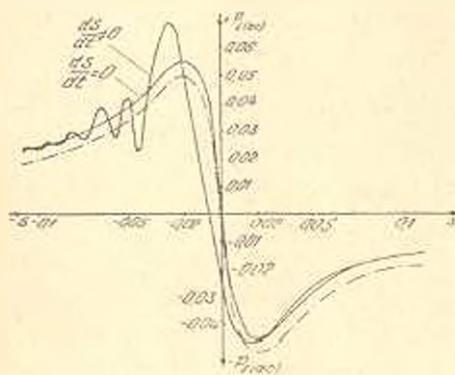


Рис. 3. Статическая и динамическая характеристики мощности генератора. Динамическая характеристика построена при ускорении $a = 0,005 \text{ 1/сек}$

стиги мощности, для вычислений интегралов, входящих в формулу (2) были использованы таблицы специальных функций [3].

Устойчивая работа генератора в области положительных скольжений (двигательный режим) не представляется возможной, ибо из-за регулирования первичного двигателя, на валу машины появляется из-

и динамической мощностей рассчитаны для схемы передачи, приведенной на рис. 2. Статическая характеристика мощности рассчитана при условии $\eta = 0$. Нижняя кривая — симметричная относительно начала координат рис. 3 — есть среднее значение статической характеристики мощности при пренебрежении последними членами формулы мощности (2).

Динамическая характеристика построена при ускорении движения ротора $a = 0,005 \text{ 1/сек}$. При построении динамической характеристики

быточный положительный момент, который вместе с электромагнитным моментом машины стремится перевести машину в область генераторного режима. Различие между статическими и динамическими характеристиками мощности имеет место в области малых скольжений и когда она меняет знак. Это различие будет тем больше, чем больше параметр η .

З а к л ю ч е н и е

При расчете режимов самосинхронизации, ресинхронизации, несинхронных АПВ целесообразно строить динамические характеристики мощности. Замена динамической характеристики мощности статической при анализе этих режимов может привести к значительным ошибкам. Ошибка, получающаяся, как разность между этими характеристиками, даже при относительно малом значении ускорения ($a = 0.105 \text{ 1/сек}$), принятое в расчете—велика. Величина ошибки тем больше, чем больше параметр η , $\eta = aT^2$ характеризующий ускорения и постоянную времени контура ротора. В области больших скольжений эти характеристики практически совпадают.

Поэтому, изменение скорости вращения ротора не оказывает влияния на начальный процесс переходного режима для этих режимов. Введение параметра η , дает возможность получить динамические характеристики для широкого класса электропередач с различными мощностями асинхронного работающих генераторов и с различными длинами этих передач. В генераторах большой мощности, где постоянные времени велики, влияние рассматриваемого фактора будет сказываться при малых ускорениях. Исключенные могут составлять случаи, когда асинхронная мощность мала по сравнению с другими составляющими электромагнитной мощности, определяющими движение ротора машины. Пользуясь методом последовательных интервалов формулу мощности можно применить и для более сложного случая движения ротора, принимая ускорение постоянным в каждом интервале. Однако такие расчеты, ввиду их громоздкости, следует вести с использованием вычислительных машин, которые следовало бы применить и для решения интегралов, входящих в формулу (2). Учет активного сопротивления линии связи смещает характеристики мощности вверх по оси ординат и тем выше, чем больше активное сопротивление передачи.

МЭИ

Поступило 17.11.1963

ՅՈՒ. Ս. ՇԱՀԱԶԱՐՅԱՆ

ՀԻՐՐՈՂԵՆՆԵՐԱՏՈՐԻ ԷԼԵԿՏՐՈՄԱԳՆԵՒԱԿԱՆ ԶՋՐՈՒԹՅՈՒՆԸ
ԱՆՅՈՒՄԱՅԻՆ ՌԵԺԻՄՆԵՐԻ ԳԵՊԳՐՈՒՄ

Ա ճ փ ո փ ո լ ճ

Գեներատորի փոխանցման տարինրան ուժիմի գեպլում, էրր սահլի փոփոխումը տեղի է աճննում բաղադրանին մեծ արագութլումը, մեքենայի

կոնստրուկցիայի մագնիսական դաշտերի կոտակված էներգիայի փոփոխությունը հետևանքով՝ զիններատուրում հոսանքների փոփոխման պրոցեսը կարող է սահքի փոփոխությունից զգալի չափով աջանալ: Այս դեպքում մեքենայի էլեկտրամագնիսական զինամիկական կոչվող կարողություն փոփոխումը (ուս դանդավ է սահքի փոփոխումը հաշվի առնելով) ստատիկականից զգալի կերպով կտարբերվի: Արքան մեծ է մեքենայի կոնստրուկցիայի հատաստան մամանակը և սահքի փոփոխման արագությունը, ալնջան ավելի է զգալի այդ տարրերությունը:

Այդպիսի սեմիոնների՝ ինչպիսիք են սինխրոնիզացիան, սինխրոնիզացիան, ոչ սինխրոնային Ա, Մ, Յ, ստատանումը և այլն ուսումնասիրությունները ֆիզիկական և մաթեմատիկական մոդելների վրա պետք է կատարել օրոպարմելով կարողությունների սեալ զինամիկական բնութագրերը: Բացառություն կարող են կազմել ալն զեպերը, երբ սինխրոն կարողությունը փոքր է: Այդպիսի համար սեմիոններն ուսումնասիրվում են պարզեցված միանկների համար՝ հաստատուն արագացումով ոտտորի շարժման զեպում:

Հոտրություն զինամիկական և ստատիկական բնութագրերի միջև առավել տարբերություն է սեղծվում փոքր սահքի բնագավտում և ալն սաացվում է ավելի մեծ, որքան մեծ է հաշվման մեջ բնդանվող պարամետրը՝ $\eta = \alpha T^2$, որը բնութագրում է ինչպես արագացումը, ալնպես էլ ոտտորի կոնստրի հաստատուն մամանակը:

η պարամետրի կիրառումը հնարալորություն է աալիս ստանալ զինամիկ բնութագրեր՝ ինչպես յալն կարգի էլեկտրահաղորման համար, ալնպես և սինխրոն աշխատող զիններատուրների տարրեր կարողությունների ու տարրեր երկարությունների համար:

Օգտվելով հաշուարական ինտերվալների մեթոդից, ստացված կարողություն բանաձևերը կարելի է կիրառել նաև ոտտորի շարժման ավելի բարդ զեպի համար արագացումը յարաքանչյուր ինտերվալում բնդանելով հաստատուն: Այսպիսի հաշվարկներում, ի նկատի առնելով նրանց մեծ մամալը, հարկավոր է օգտագործել էլեկտրոնային հաշվիչ սեմիոններ:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Л. Г. Мамиконянц, Токи и моменты асинхронных и синхронных машины при изменении скорости их вращения, Электричество № 8, 1958.
2. А. В. Иванов-Смоленский, Влияние скорости изменения скольжения на момент асинхронной машины, Электричество, № 6, 1950.
3. В. И. Фадеева и Н. М. Терентьев, Таблицы значений функции

$$W(z) = e^{-z} \left(1 + \frac{2i}{V\pi} \int_0^z e^t dt \right)$$

от комплексного аргумента, Гостехиздат, 1954.

4. Ю. М. Шахназарян, Активная и реактивная мощности у шунта приемной электрической системы при нестационарном асинхронном режиме гидрогенератора Известия АН СССР, ОТН «Энергетика и атомника», № 4, 1962.