

ИССЛЕДОВАНИЕ АВАРИЙНОГО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ГЕНЕРАТОРНОМ АГРЕГАТЕ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Конева С.А., Цалоев В.М.

Ключевые слова: синхронная машина, момент инерции, приводной двигатель, угол вылета ротора, синхронная скорость.

Аннотация. Выполнен анализ переходного электромеханического процесса, возникающего в генераторном агрегате в случае внезапного прекращения подачи энергоносителя приводному двигателю.

INVESTIGATION OF THE EMERGENCY TRANSITION PROCESS IN THE GENERATOR SET OF THE SHIP'S POWER PLANT

Koneva S.A, Tsaloev V.M.

Keywords: synchronous machine, moment of inertia, drive motor, rotor departure angle, synchronous speed.

Abstract. Analysis of transitive electro-mechanical processes occurring in generating unit in case of sudden stopping of the energy carrier supply in the drive motor is made.

В процессе эксплуатации судовой электроэнергетической системы, в состав которой входит судовая электростанция, возможны случаи возникновения различных аварийных ситуаций, которые могут привести к блэкауту. На судах, в качестве основных источников электроэнергии, как правило, используются генераторные агрегаты, приводным двигателем которых является дизель.

Интерес представляет ситуация, когда в приводной двигатель (дизель) судового синхронного генератора внезапно прекращена подача топлива.

В данной ситуации синхронная машина, включенная в сеть, при внезапном изменении режима, совершает колебательные движения около нового установившегося положения. Во вращающейся с синхронной скоростью системе координат машину можно представить в виде динамической системы, обладающей инерционными, упругими связями и свойствами рассеивать энергию.

Опираясь на такое представление, можно найти аналогию между структурой общего уравнения движения Лагранжа и уравнением движения синхронной машины [1].

Выражения для кинетической энергии, потенциальной энергии, диссипативной функции и обобщенных сил можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} &= \frac{d}{dt} \frac{\partial (T - V)}{\partial \dot{\theta}} = \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} = J_c \Delta \ddot{\theta}; \\ -\frac{\partial L}{\partial \theta} &= -\frac{\partial (T - V)}{\partial \theta} = \frac{\partial V}{\partial \theta} = \left[\frac{U_c E_{d0}}{x_d} \cos \theta_0 + \frac{(x_d - x_q) U_c^2}{x_d x_q} \cos 2\theta_0 \right] \Delta \theta;\end{aligned}$$

$$\frac{\partial F}{\partial \dot{\theta}} = \frac{U_C^2}{2\omega_C x_d} [(r_d + r_q) - (r_d - r_q) \cos 2\theta_0] \Delta \dot{\theta};$$

$$\Lambda = \Delta M_{д.с} - \frac{U_C}{x_d} \sin \theta_0 \Delta E_d,$$
(1)

где θ – угол отклонения продольной оси ротора от оси магнитного поля статора (угол вылета ротора); θ_0 – угол вылета ротора до нарушения режима; $\dot{\theta}$ – скорость вращения генераторного агрегата (ГА); r_d, r_q, x_d, x_q – активное и синхронное индуктивное сопротивления генератора по продольной и поперечной осям соответственно.

По аналогии с уравнениями аналитической динамики в этих равенствах можно ввести:

– коэффициент синхронной жесткости

$$C = \frac{U_C E_{d0}}{x_d} \cos \theta_0 + \frac{(x_d - x_q) U_C^2}{x_d x_q} \cos 2\theta_0,$$
(2)

где U_C, E_{d0} – напряжение сети и э.д.с. генератора до нарушения режима;

– коэффициент рассеяния, называемый здесь демпферным коэффициентом

$$D = \frac{U_C^2}{2\omega_C x_d} [(r_d + r_q) - (r_d - r_q) \cos 2\theta_0],$$
(3)

где ω_C – угловая частота свободных колебаний;

– коэффициент влияния возбуждения

$$C_B = \frac{U_C}{x_d} \sin \theta_0.$$
(4)

Следовательно, кинетическая энергия, потенциальная энергия и диссипативная функция (функция рассеивания энергии) для синхронной машины в рассматриваемых условиях будут соответственно равны

$$T = \frac{1}{2} J \Delta \dot{\theta}^2; \quad V = \frac{1}{2} C \Delta \theta^2; \quad F = \frac{1}{2} D \Delta \dot{\theta}^2.$$
(5)

В принятых условных обозначениях, уравнение движения синхронной машины в вариациях примет вид уравнения движения Лагранжа

$$J \Delta \ddot{\theta} + D \Delta \dot{\theta} + C \Delta \theta = \Delta M_{д} - \Delta M_{г},$$
(6)

где $\Delta M_{г} = C_B \Delta E_d$ – момент сопротивления на валу генератора, обусловленный изменением его возбуждения.

В случае внезапного прекращения подачи энергоносителя приводному двигателю, переходный электромеханический процесс, возникающий в генераторном агрегате для n включенных на параллельную работу агрегатов может быть исследован при помощи системы дифференциальных уравнений

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \Delta \dot{\theta}_n} + \frac{\partial V}{\partial \Delta \dot{\theta}_n} + \frac{\partial F}{\partial \Delta \dot{\theta}_n} = \Delta M_{дн} - \Delta M_{Гн}. \quad (7)$$

$M_{дн}, M_{Гн}$ – вращающий момент двигателя и момент сопротивления генератора соответственно.

Начальные условия будут определяться исходными режимами агрегатов; у аварийного агрегата в случае прекращения подачи энергоносителя вращающий момент изменит знак и независимо от вида двигателя может считаться постоянным. Наиболее верно такое приближение для турбинного двигателя; у двигателя внутреннего сгорания при вращении его без подачи топлива момент сопротивления, строго говоря, будет иметь пульсирующий характер вследствие компрессии воздуха в цилиндрах и переменной величины момента инерции. Однако пульсация момента имеет настолько малую амплитуду и высокую частоту, что при исследовании свободного движения агрегата этими явлениями можно пренебречь. Очевидно, исследование указанного аварийного режима в электроустановке, состоящей из нескольких параллельно включенных агрегатов, будет тем сложнее, чем больше агрегатов в электроустановке.

Как показывают теоретические и экспериментальные исследования, переходный электромеханический процесс генераторного агрегата переменного тока с малым значением комплексного параметра [2] при параллельной работе с сетью или с однотипными машинами практически одинаков. В силу этого, качественную картину и количественные соотношения параметров переходного электромеханического процесса в данном случае можно получить на примере одного генераторного агрегата, включенного параллельную работу с энергоемкой сетью [3].

Движение агрегата с момента прекращения подачи его двигателю энергоносителя может быть описано на основании общего уравнения Лагранжа выражением

$$J\Delta\ddot{\theta} + D\Delta\dot{\theta} + C\Delta\theta = -\Delta M_{д}, \quad (8)$$

где $\Delta M_{д}$ – тормозной момент, появляющийся у приводного двигателя генератора; J – приведенный момент инерции вращающихся масс (приводного двигателя, генератора, редуктора).

Начальные условия процесса будут зависеть от исходного режима, который определяет величину угла вылета ротора $\Delta\theta_0$ и скорость его изменения $\Delta\dot{\theta}_0$ в момент начала процесса.

Решение уравнения (8), определяющее затухающее колебательное движение, целесообразно представить в следующем виде

$$\Delta\theta(t) = -\frac{\Delta M_{д}}{\omega_c^2} + \frac{1}{\beta} \left[\left(\frac{\Delta M_{д}}{\omega_c} + \omega_c \Delta\theta_0 \right) \sin(\beta t + \psi_c) + \Delta\dot{\theta}_0 \sin \beta t \right] e^{-\alpha t}, \quad (9)$$

где $\omega_c = \sqrt{CJ^{-1}}$; $\alpha = 2DJ^{-1}$; $\beta = \sqrt{\omega_c^2 - \alpha^2}$; $\psi_c = \arctg \frac{\beta}{\alpha}$ – соответственно круговая частота свободных колебаний агрегата, коэффициент затухания, характеристическая угловая частота и угол сдвига фазы колебаний.

Колебательное движение ротора генератора происходит около нового значения угла вылета, определяемого первым членом уравнения (9). Скорость изменения угла, т.е. скорость вращения агрегата, может быть найдена дифференцированием полученного решения

$$\Delta \dot{\theta}(t) = \frac{1}{\beta} \left(\left(\frac{\Delta M_{\text{д}}}{\omega_c} + \omega_c \Delta \theta_0 \right) [\beta \cos(\beta t + \psi_c) - \alpha \sin(\beta t + \psi_c)] + \Delta \dot{\theta}_0 (\beta \cos \beta t - \alpha \sin \beta t) \right) e^{-\alpha t}. \quad (4)$$

Из этого выражения видно, что возникающие колебания угла вылета ротора и скорости вращения агрегата затухают с постоянной времени $T = \alpha^{-1}$. Быстрота затухания пропорциональна коэффициенту демпфирования и обратно пропорциональна суммарному моменту инерции агрегата J . Причем если затухающие колебания угла происходят около нового его значения, то колебания скорости – около прежней синхронной скорости вращения агрегата.

На рисунке 1 представлены кривые изменения угла вылета ротора и его скорости вращения, рассчитанные по уравнениям (8), (9).

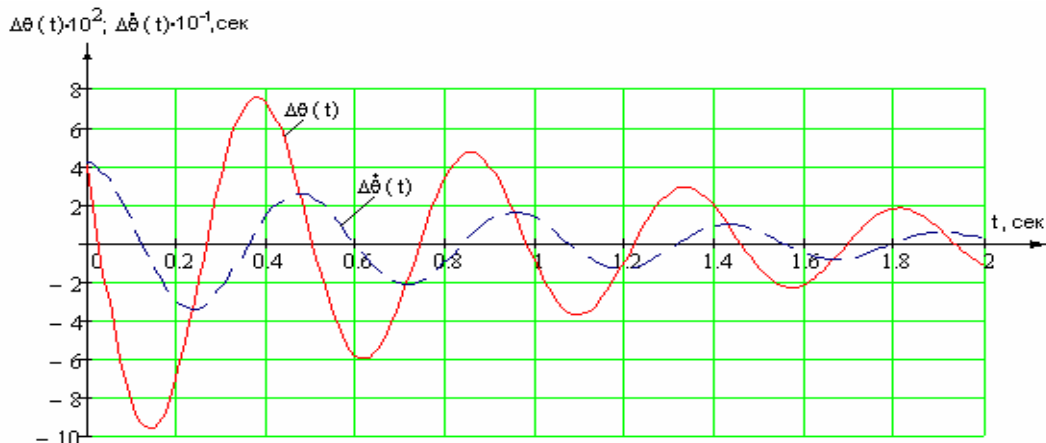


Рис. 1. Кривые изменения угла вылета ротора и его скорости вращения

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы для определения основных динамических свойств агрегата в случае прекращения подачи энергоносителя к приводному двигателю генератора.

При известном моменте инерции агрегата и при известных параметрах генератора, позволяющих определить его синхронную жесткость, кривые указанного режима позволяют по кривым затухания процесса найти труднорассчитываемую величину демпферного коэффициента машины.

Список литературы

1. Мелешкин Г.А. Колебания роторов судовых синхронных генераторных агрегатов при параллельной работе. – Л.: Судостроение, 1981. – 248 с.
2. Мелешкин Г.А. Переходные режимы судовых электроэнергетических систем. – Л.: Судостроение, 1988. – 348 с.
3. Фрейдзон И.Р. Судовые автоматизированные электроприводы и системы. – Л. Судостроение, 1980. – 440 с.

References

1. Meleshkin G.A. Oscillations of the rotors of marine synchronous generating units in parallel operation. – L.: Shipbuilding, 1981. – 248 p.
2. Meleshkin G.A. Transitional regimes of ship electric power systems. – L.: Shipbuilding, 1988. – 348 p.
3. Freidson R.I. Ship automated electric drive and systems. – L.: Shipbuilding, 1980. – 440 p.

Конева Светлана Андреевна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, e-mail: ksa2602@mail.ru	Koneva Svetlana Andreevna – candidate of technical sciences, associate professor, head of Department, ksa2602@mail.ru
Цалоев Владимир Муратович – старший преподаватель e-mail: 1._@mail.ru	Tsaloev Vladimir Muratovich – senior lecturer, 1._@mail.ru
Кафедра «Судовое электрооборудование», «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия	Department "Marine electrical equipment", Sevastopol state University, Sevastopol, Russia

Received 11.12.2019