

УДК 621.321

ИССЛЕДОВАНИЕ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА MATLAB/SIMULINK ВЛИЯНИЯ УСТРОЙСТВА ПРОДОЛЬНОЙ ЁМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Фирсов Э. А.

Научный руководитель – к. т. н., доцент Старжинский А. Л.

Целью исследования является повышение пропускной способности и устойчивости электроэнергетической системы с помощью устройства емкостной продольной компенсации (УПК).

УПК выполняются в виде конденсаторных батарей, которые включаются в расщелку линий электропередач.

По фактору статической устойчивости генераторов электростанций предельная передаваемая мощность в системе, состоящей из генераторов, трансформаторов и линий электропередачи с соответствующими сопротивлениями X_g , X_T , X_L , без учёта потерь определяется по выражению [1]:

$$P_{пр} = \frac{EU_c}{X_g + X_T + X_L}, \quad (1)$$

где E – ЭДС генераторов, U_c – напряжение на шинах системы.

Из формулы (1) видно, что уменьшение сопротивления линии приведёт к увеличению пропускной способности системы электропередачи. Одним из способов уменьшения сопротивления линии является применение УПК. В этом случае эквивалентное сопротивление, если не учитывать распределённость параметров линии и потери, определяется выражением [2]:

$$X_{лз} = X_L - X_c = X_L(1 - K_c),$$

где X_c – емкостное сопротивление УПК, K_c – степень продольной компенсации.

Рассмотрим электроэнергетическую систему (ЭЭС), принципиальная схема которой представлена на рисунке 1. Она включает в себя синхронный генератор (СГ); повышающий трансформатор (Т1); линию электропередачи (Л); УПК; автотрансформатор связи (Т2); энергосистему (ЭС).

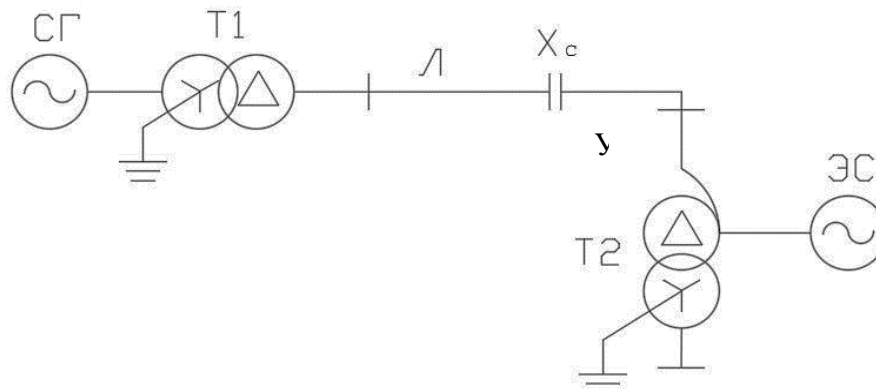


Рисунок 1 Схема ЭЭС

Определим параметры элементов схемы. Примем $S_{\sigma} = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{\sigma} = 230 \text{ кВ}$
 Параметры СГ – ТВВ-800-2ЕУЗ [3] приведены в таблице 1.

Таблица 1 Параметры СГ

Номинальная полная мощность $S_{н}$, МВ·А	888,9
Номинальная активная мощность $P_{н}$, МВт	800
Номинальное напряжение $U_{н}$, кВ	24
Момент инерции J , т·м ²	33·0,25
Номинальная частота вращения $\omega_{н}$, об/мин	3000
X'_d , отн. ед.	0,307

Постоянная инерции [4]:

$$H = \frac{2,74 \cdot J^2 \cdot \omega_{н}^2}{2 \cdot P_{н}} = \frac{2,74 \cdot (33 \cdot 0,25)^2 \cdot 3000^2}{2 \cdot 800 \cdot 10^6} = 1,049 \text{ с.}$$

Сопротивление статора в относительных единицах:

$$R_{ст*} = R_{ст} \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{н}^2} = 0,0011 \cdot \frac{1000}{24^2} = 0,002.$$

Коэффициент демпфирования задавался в соответствии с рекомендациями из работы [6]: $K_d = 10$.

Собственные нужды генератора:

$$P_{сн} = 800 \cdot 0,07 = 56 \text{ МВт.}$$

Параметры трансформатора Т1 – ТНЦ-1000000/500 [3] и автотрансформатора Т2, в качестве которого выбираем три однофазных трансформатора АОДЦТН – 267000/500/220 [5] приведены в таблице 2.

Расчёт параметров трансформатора Т1 [4]:

Активное и индуктивное сопротивление:

$$R_{т1*} = \frac{\Delta P_k \cdot S_{\sigma} \cdot 10^{-3}}{S_{т1}^2} = \frac{1800 \cdot 1000 \cdot 10^{-3}}{1000^2} = 0,0018 \text{ отн. ед.}$$

ΔP_k – номинальные потери короткого замыкания.

$$X_{т1*} = \frac{U_{к\%} \cdot S_{\sigma}}{100\% \cdot S_{т1}} = \frac{14,5 \cdot 1000}{100 \cdot 1000} = 0,145 \text{ отн. ед.}$$

$U_{к\%}$ – номинальное напряжение короткого замыкания.

При задании параметров в относительных единицах индуктивности каждой из обмоток трехфазного трансформатора совпадают с их индуктивными сопротивлениями [4].

Активное сопротивление R_{m*} и индуктивность L_{m*} цепи намагничивания:

$$R_{m*} = \frac{S_{н}}{\Delta P_0 \cdot 10^{-3}} = \frac{10^3}{570 \cdot 10^{-3}} = 1754 \text{ отн. ед.}$$

ΔP_0 – потери холостого хода, кВт.

$$L_{m*} = \frac{100}{I_{x\%}} = \frac{100}{0,45} = 222 \text{ отн. ед.}$$

$I_{x\%}$ – ток холостого хода, %.

Расчёт параметров трансформатора Т2 [4]:

$$U_{кВ\%} = 0,5 \cdot (U_{вн} + U_{вс} - U_{сн}) = 0,5 \cdot (37 + 11,5 - 23) = 12,75\%;$$

$$U_{кС\%} = 0,5 \cdot (U_{вс} + U_{сн} - U_{вн}) = 0,5 \cdot (11,5 + 23 - 37) = -1,25\%;$$

$$U_{кН\%} = 0,5 \cdot (U_{вн} + U_{сн} - U_{вс}) = 0,5 \cdot (37 + 23 - 11,5) = 24,25\%;$$

$$X_{в*} = \frac{12,75 \cdot 1000}{100 \cdot 267 \cdot 3} = 0,159 \text{ отн. ед.};$$

$$X_{с*} = \frac{1,25 \cdot 1000}{100 \cdot 267 \cdot 3} = 0,016 \text{ отн. ед.};$$

$$X_{н*} = \frac{24,25 \cdot 1000}{100 \cdot 267 \cdot 3} = 0,303 \text{ отн. ед.};$$

$$R_{т2*} = \frac{490 \cdot 1000 \cdot 10^{-3}}{(267 \cdot 3)^2} = 7,6 \cdot 10^{-4} \text{ отн. ед.};$$

$$R_{м*} = \frac{10^3}{150 \cdot 10^{-3}} = 6667 \text{ отн. ед.};$$

$$L_{м*} = \frac{100}{0,35} = 286 \text{ отн. ед.}$$

Таблица 2 Параметры Т1 и Т2

Параметр	Значение		
	Т1	Т2	
Номинальная полная мощность, МВ·А	1000	267	
Частота, Гц	50	50	
Параметры стороны ВН			
Номинальное напряжение, кВ	525	500	
Активное сопротивление, отн. ед.	0,0018/2	$\frac{7,6 \cdot 10}{3}$	
Индуктивность, отн. ед.	0,145/2	0,159	
	сторона НН	сторона СН	сторона НН
Номинальное напряжение, кВ	24	230	10,5
Активное сопротивление, отн. ед.	0,0018/2	$\frac{7,6 \cdot 10}{3}$	$\frac{7,6 \cdot 10}{3}$
Индуктивность, отн. ед.	0,145/2	0,016	0,303
Параметры цепи намагничивания			
Активное сопротивление, отн. ед.	1754	6667	
Индуктивность, отн. ед.	222	286	

Параметры воздушной линии Л напряжением 500 кВ:

$$X_0^1 = 0,3 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}, R_0^1 = 0,02 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

– удельное индуктивное и активное сопротивления прямой последовательности соответственно (справ. данные);

$$X_0^0 = 0,9 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}, R_0^0 = 0,17$$

$\frac{\text{Ом}}{\text{км}}$ – удельное индуктивное и активное сопротивления нулевой последовательности соответственно (справ. данные);

$$B_0^0 = 2,88 \cdot 10^{-6} \frac{\text{См}}{\text{км}}, B_0^1 = 3,85 \cdot 10^{-6}$$

$\frac{\text{См}}{\text{км}}$ – удельные ёмкостные проводимости нулевой и прямой последовательности соответственно (справ. данные);

$$L_0^1 = \frac{X_0^1}{2\pi f} = 9,549 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Гн}}{\text{км}}, L_0^0 = \frac{X_0^0}{2\pi f} = 2,865 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Гн}}{\text{км}}$$

– удельная индуктивность прямой и нулевой последовательности соответственно;

$$C_0^1 = \frac{B_0^1}{2\pi f} = 1,225 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Ф}}{\text{км}}, L_0^0 = \frac{B_0^0}{2\pi f} = 0,917 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Ф}}{\text{км}}$$

– удельная индуктивность прямой и нулевой

Ёмкость УПК (С) находим исходя из значения степени компенсации, которую принимаем $K_c = 0,5$ (по рекомендации [2]).

$$K_c = \frac{X_c}{X_0^1 \cdot l} = \frac{1}{2\pi f C X_0^1 \cdot l} = 0,5;$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_0^1 \cdot l \cdot 0,5},$$

где $l = 500$ км – длина воздушной линии.

$$C = 4 \cdot 10^{-5} \text{ Ф.}$$

Одним из самых популярных математических пакетов для моделирования элементов и объектов электроэнергетики является MATLAB/Simulink. Его возможности позволяют рассчитывать установившиеся и переходные режимы в электрических цепях с различными функциональными элементами, включая электродвигатели, трансформаторы, линии электропередачи, синхронные генераторы, а также рассматривать вопросы управления ими.

Построим модель рассматриваемой нами ЭЭС в программе MATLAB приложении Simulink (рисунок 2).

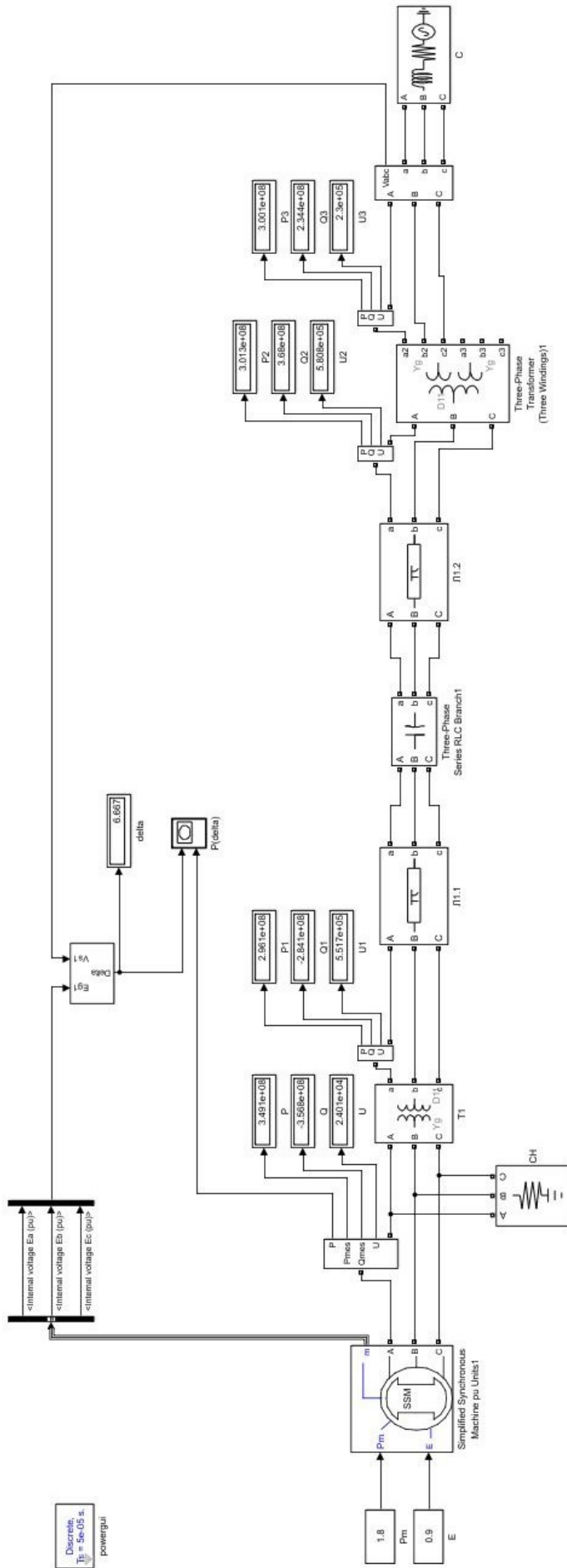


Рисунок 2 Модель ЭЭС

В результате были построены графики зависимости активной мощности от угла δ при отсутствии (рисунок 3) и наличии УПК (рисунок 4).

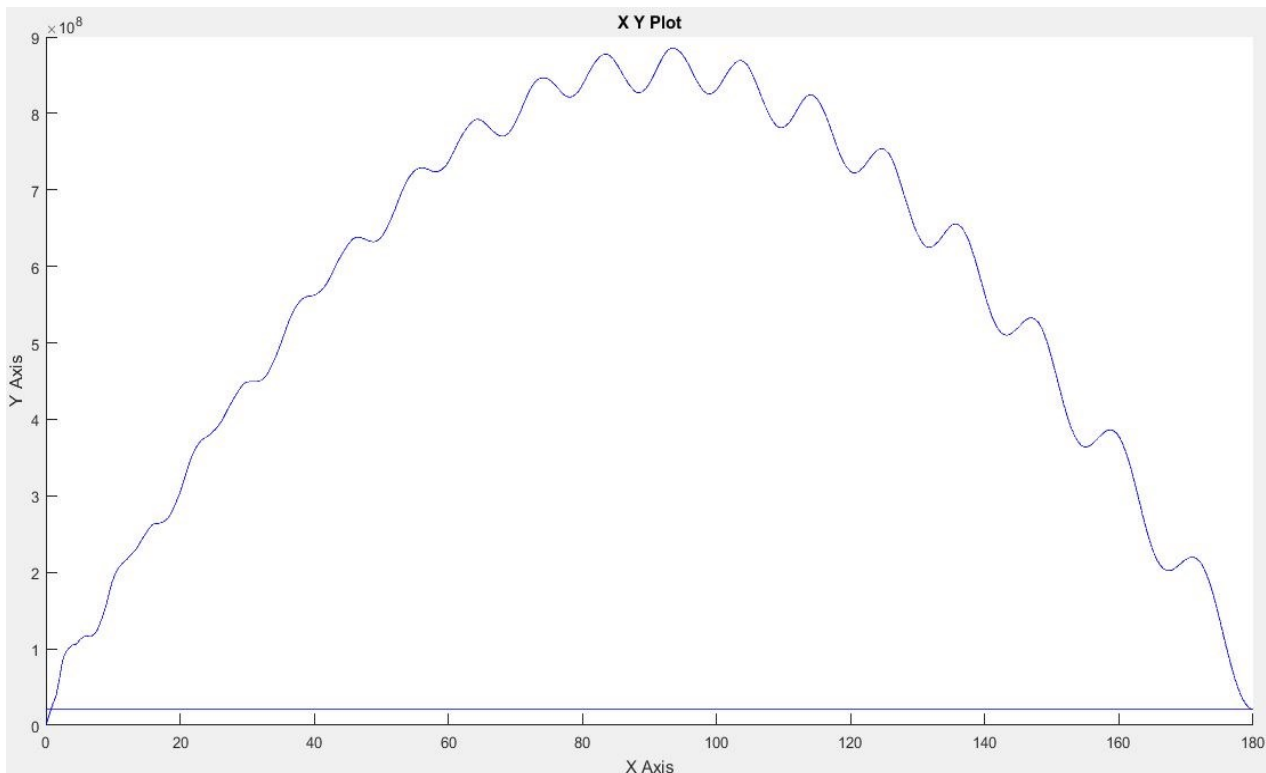


Рисунок 3 Угловая характеристика активной мощности без УПК

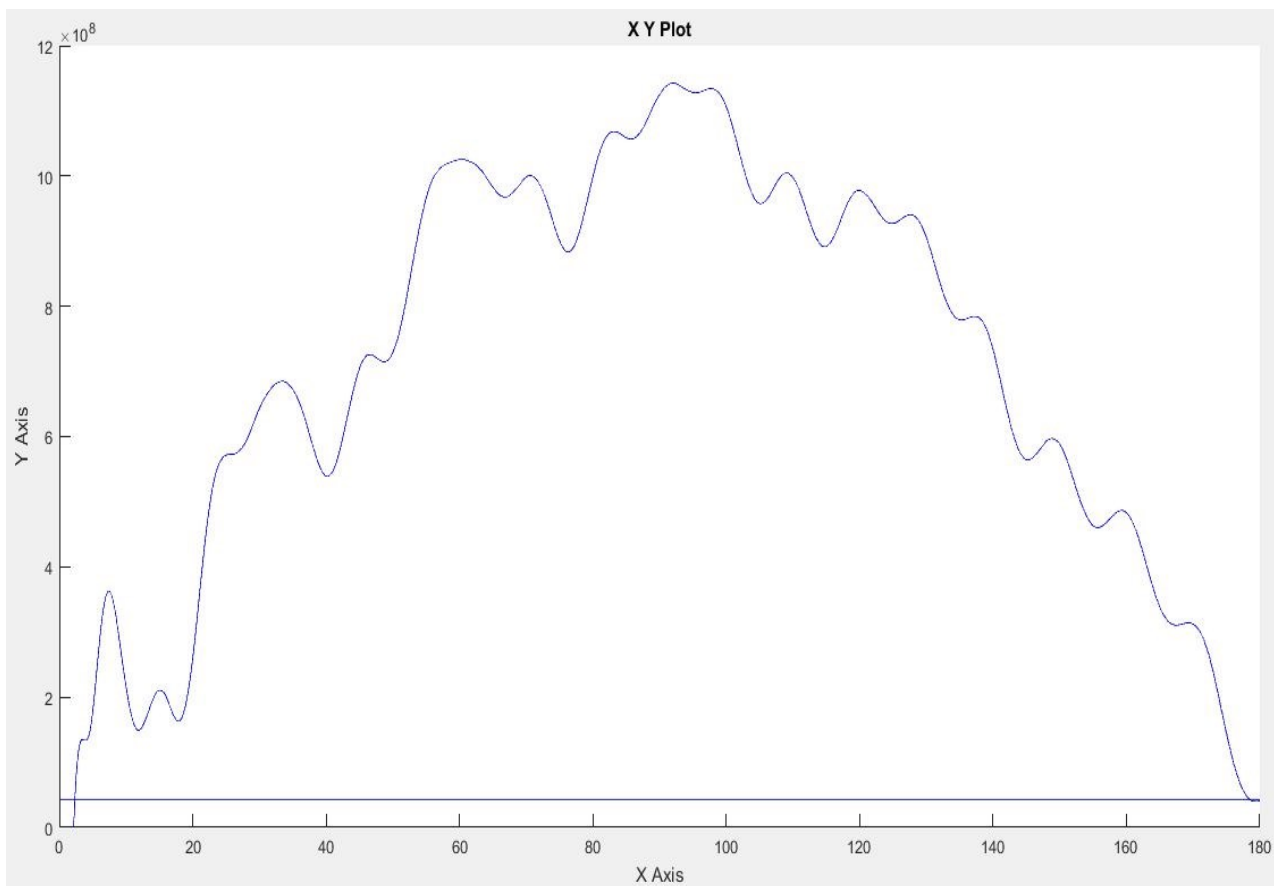


Рисунок 4 Угловая характеристика активной мощности с УПК

Из графиков угловых характеристик видно, что пределы передаваемой мощности равны: $P_{\max_1} = 8,9 \cdot 10^8$ Вт (без УПК) и $P_{\max_2} = 11,7 \cdot 10^8$ Вт (с УПК). Исходя из этого можно заключить, что в рассматриваемом случае устройство емкостной продольной компенсации позволяет увеличить пропускную способность и динамическую устойчивость на

$$\frac{11,7 - 8,9}{8,9} \cdot 100\% \approx 31,5\%.$$

Литература

1. Передача и распределение электрической энергии: Учебное пособие / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – Ростов-н /Д.: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006. – 720с. (Серия “Высшее образование”).
2. Устойчивость электроэнергетических систем: учебное пособие / Е. В. Калентионюк. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 375 с.
3. Неклепаев Б. Н., Крючков И. П. Электрическая часть станций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. Пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.: ил.
4. Зарудная, А.П. Особенности применения пакета MATLAB/Simulink для анализа статической устойчивости синхронных генераторов в энергосистеме / А.П. Зарудная, К.Е. Горшков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 3. – С. 43–54. DOI: 10.14529/power170305.
5. Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д. Л. Файбисовича. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ЭНАС, 2012. – 376 с. : ил.
6. Забелло, Е. Применение прикладных программ в расчетах режимов и устойчивости работы собственных генерирующих источников при их параллельной работе с энергосистемой / Е. Забелло, В. Тополев // Энергетика и ТЭК. Наука для практики. – 2011. – № 9/10. – С. 20–22.