



КГЭУ

ВЕСТНИК

КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА



KAZAN STATE POWER ENGINEERING
UNIVERSITY BULLETIN

2020, том 12
№1 (45)

СО Д Е Р Ж А Н И Е

ЭНЕРГЕТИКА

САВИНА М.В., НДЛОВУ Э.Т., МИНГАЛЕЕВА Г.Р. Оценка эффективности парового котла типа КЕ при сжигании низкосортного топлива.	3
ГРАЧЕВА Е.И., ГОРЛОВ А.Н., АЛИМОВА А.Н. Анализ сопротивлений контактных соединений низковольтной коммутационной аппаратуры	13
ВАЛЕЕВ И.М., АЛЬЗАККАР А.М-Н. Гармоники и их влияние при определении метода компенсации реактивной мощности в электрических сетях	24
ГЛАЗЫРИН Г.В., УСОВ Н.С., БАКЛАНОВ Д.В. Анализ исходного числа дефектов в программном обеспечении микропроцессорного устройства релейной защиты	40
ГИЛЬФАНОВ К.Х., ГАЙНУЛЛИН Р.Н., ТИЕН НГУЕН. Энергосберегающая система отопления объектов электроэнергетики.	46
СЕКРЕТАРЕВ Ю.А., ЛЕВИН В.М. Выбор и принятие решений по управлению ремонтами оборудования в системах электроснабжения с монопотребителем.	54
АБАСС З.А., ПАВЛЮЧЕНКО Д.А., КОБОБЕЛЬ И.В. Перспективы использования солнечной энергии в Ираке.	63
ТОШХОДЖАЕВА М.И., ХОДЖИЕВ А.А. Математическая модель влияния природных и эксплуатационных факторов на надёжность ВЛЭП-110 Кв в условиях резко континентального климата	71
ХАЛЪЯСМАА А.И., МАНУСОВ В.З. Опыт реализации комплексной системы диагностики высоковольтного оборудования.	82
ЛИТВИНОВ И.И., ОСИНЦЕВ А.А., ФРОЛОВА Е.И., МАРЧЕНКО А.А. Способ получения годографа синхронных качаний с заданными характеристиками на комплексной плоскости.	93

УДК 621.316.7

ГАРМОНИКИ И ИХ ВЛИЯНИЕ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

И.М. Валеев, А.М-Н. Альзаккар

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
ahmadalzakkar86@gmail.com

Резюме: В этой статье представлено моделирование различных способов компенсации реактивной мощности электрической сети с использованием программы Matlab, где были рассчитаны параметры трансформаторов и фильтров, использованных в настоящем исследовании, а затем смоделированы сеть и введены рассчитанные параметры трансформаторов и фильтров, также проанализированы различные случаи для компенсации реактивной мощности и произведен выбор способа, который даст низкие значения гармоник. Отмечается, что сеть является трехфазной и сбалансированной, фильтры были установлены в сети 5,5 кВ, и результаты показали, что лучший способ компенсации реактивной мощности - это установка резонансного шунтирующего фильтра, настроенный на (5-ю) гармонику, и (2-й) демпфирующий фильтр, настроенный на (7-ю) гармонику.

Ключевые слова: Гармоника, спектр, полное гармоническое искажение (ПГИ), нарушенное оборудование, антирезонансный, порядок резонанса.

Благодарности: Работа, по результатам которой выполнена статья, выполнена совместно с научным руководителем И.М. Валеевым, д.т.н., профессор ИЭЭ КГЭУ, научно-исследовательскими лабораториями на базе КГЭУ и Университета Аль-Баас.

HARMONICS AND THEIR INFLUENCE WHEN DETERMINING THE METHOD OF COMPENSATION OF JET POWER IN ELECTRICAL NETWORKS

IM. Valeev, Ahmad M-N. Alzakkar

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
ahmadalzakkar86@gmail.com

Abstract: In this research, we will introduce the modeling of different ways to compensate for the reactive power of an electrical grid using Matlab, where the parameters of transformers and filters used in this exam will be calculated, and then modeling the network and enter the calculated parameters of transformers and filters and then discuss different cases to compensate the reactive power and choose the way that gives low values of the harmonics, note that the grid is three-phase and balanced and filters will be installed on 5.5 KV grid, and the results give that the best way to compensate the reactive power is to install the resonant shunt filter tuned on (5th) harmonic and the (2nd) damped filter tuned on the (7th) harmonic.

Keywords: Harmonic, spectrum, total harmonic distortion (THD), disturbing equipment, anti-resonant, the order of resonance .

Acknowledgements: Work by results of which article is executed is executed together with the research supervisor I.M. Valeev, the Dr. Sci. Tech., professor of IEPE KSPEU, research laboratories on the basis of KSPEU and the University of Al Ba'ath.

Введение

Электричество обычно распределяется в виде трех волн напряжения, образующих трехфазную синусоидальную систему [1, 2]. Одной из характеристик такой системы является ее форма волны, которая всегда должна оставаться как можно ближе к чистой синусоидальной волне. Если искажения выходят за определенные пределы, как это часто бывает в сетях, включающих источники гармонических токов и напряжений, таких как

дуговые печи, преобразователи статической мощности, системы освещения и т. д. [3, 4]. Форма сигнала должна быть исправлена [5, с.3].

Методика исследования

Параллельный резонанс (антирезонансный):

При наличии конденсаторной батареи гармонические помехи могут достигать опасного уровня. На определенных частотах существует резонанс между конденсаторной батареей и реактивным сопротивлением сети, видимым с клеммой батарей. Результатом является усиление с различной степенью демпфирования гармонических токов и напряжений, если порядок резонанса такой же, как у одного из гармонических токов, вводимых возмущающим оборудованием. Это значительное нарушение может быть опасным для оборудования. Данная серьезная проблема будет решена в дальнейшей перспективе.

Описанное явление называется параллельным резонансом. Что касается частот гармоник, и для начального приближения сеть может быть представлена, как на рис.1,2 [5, с.14].

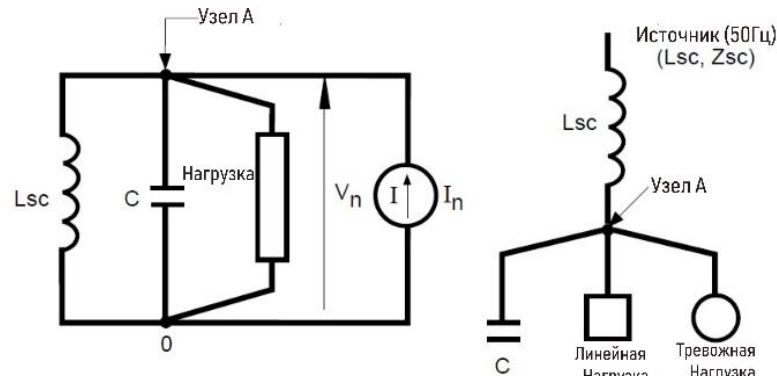


Рис.1.эквивалентные схемы для цепи, подверженной воздействию гармонических токов и включающей конденсаторную батарею.

а) гармоническое электрическое описание фазы. б)однолинейная схема.

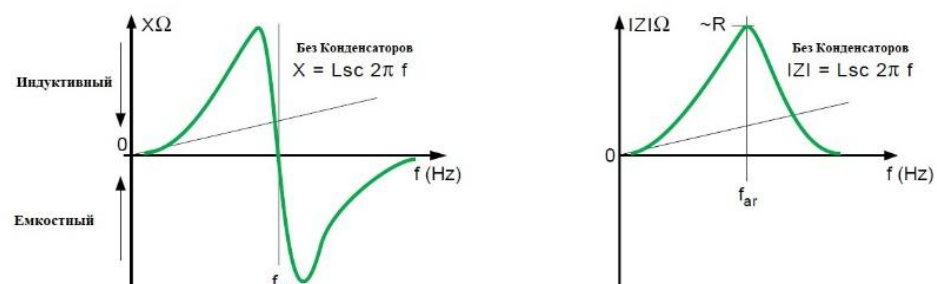


Рис.2. Кривые, показывающие полное сопротивление из-за нагрузок и сопротивления проводников]

L_{sc} – индуктивность короткого замыкания в сети выше по потоку, видимая с шин, к которым подключены конденсаторная батарея и возмущающее оборудование.

C – конденсаторы.

I_n – ток поврежденного оборудования.

Реактивное сопротивление цепи отражателя:

- индуктивный для низких частот, включая основную частоту.
- увеличивается с частотой

Методы компенсации реактивной мощности: [5, с.17].

2 – Конденсаторная батарея против гармонических перегрузок:

Такие решения часто называют отрегулированными конденсаторными батареями или отрегулированными фильтрами. Выбор L таков, что ветвь LC (где L – реактор, а C – конденсаторы компенсации реактивной мощности) ведет себя индуктивно для частот гармоник по всему спектру. В результате резонансная частота f_r этой ветви будет ниже спектра мешающего оборудования. В этом случае ветвь LC и сеть L_{sc} индуктивны по всему спектру, и гармонические токи, вводимые возмущающим оборудованием, делятся способом, обратно пропорциональным импедансу. Поэтому гармонические токи сильно ограничены в ветви LC , защищая конденсаторы, и основная часть гармонических токов протекает в остальной части сети, особенно в импедансе короткого замыкания. Внутри текущего спектра нет анти-резонанса. Форма сетевого сопротивления, видимая из шин, к которым подключена ветвь LC , показана на рис.3:[5, с.17]

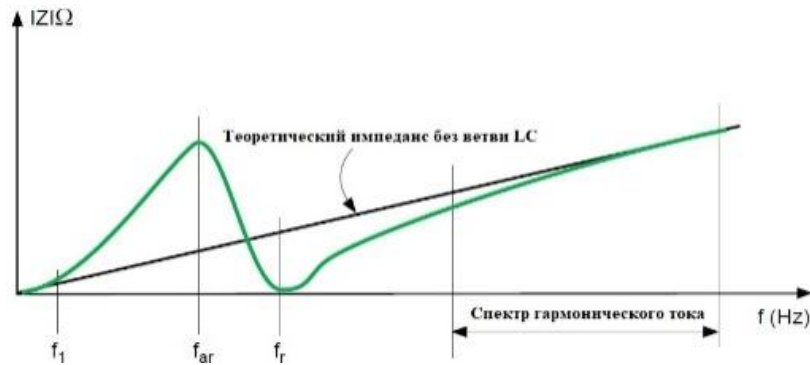


Рис.3. Конденсаторы защищены, когда f_r значительно ниже спектра гармоник

Резонансные шунтирующие фильтры:

Резонансный шунтирующий фильтр состоит из ветви LC с частотой

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Характеристики этого фильтра зависят от $n_r = f_r / f_1$ порядка частоты настройки фильтра, при этом: f_r = частота настройки, f_1 = основная частота (50 Гц).

Реактивная мощность для компенсации: Q_{var} . Резонансный шунт, ведущий себя как конденсатор ниже своей частоты настройки, способствует компенсации реактивной мощности на частоте питания. Реактивная мощность, создаваемая шунтом на соединительных шинах для рабочего напряжения U_1 определяется следующим уравнением:

$$Q_{var} = \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} U_1^2 C 2\pi f_1 \quad (2)$$

C – емкость между фазами и нейтралью одной из 3 ветвей блока фильтров, представленных в виде схемы звезды. Ожидалось, что присутствие реактора не увеличит подаваемую реактивную мощность. Причиной является увеличение напряжения на частоте питания f_1 , вызванное индуктивностью на клеммах конденсатора сопротивление: $X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$

и фактор качества: $q = \frac{X_0}{r}$. Эффективный фильтр должен иметь реактор с большим добротностью q рис.4 [5, с.19], поэтому $r \ll X_0$ на частоте f_r . Приблизительные значения q – для реакторов с воздушным сердечником, больше 75 для реакторов с железным сердечником.

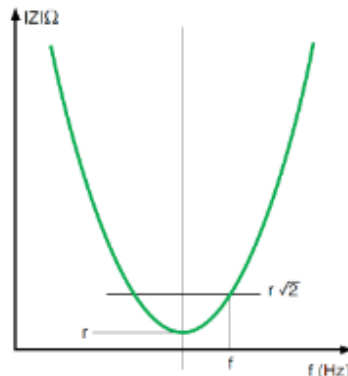


Рис.4. Кривая Z в зависимости от f для резонансного шунта

3-демпфированные фильтры (демпфирующий фильтр 2-го порядка):

Демпфирующий фильтр 2-го порядка состоит из резонансного шунта с демпфирующим резистором R , добавленным на клеммах реактора. Демпфированный фильтр 2-го порядка имеет нулевое реактивное сопротивление для частоты f_r выше частоты f ,

$$f_r = \frac{1 + qQ}{2\pi q \sqrt{(Q^2 - 1)LC}} \quad (3)$$

где Q – добротность демпфирующего фильтра, q – добротность реактора.

Основные электрические характеристики демпфирующего фильтра 2-го порядка зависят от:

$$n_r = \frac{f_r}{f_1} \quad (4)$$

где f_r – частота настройки, f_1 – основная частота (50 Гц).

Эти характеристики: для демпфирующего фильтра 2-го порядка при рабочем напряжении U_1 (индекс 1 относится к основному) реактивная мощность примерно такая же, как для резонансного шунта с той же индуктивностью и емкостью, на практике (рис 5). [5, с.22]

:

$$Q_{var} = \frac{n_r^2}{n_{r-1}^2} U_1^2 C_2 \pi f_1, \quad (5)$$

где C = емкость между фазами и нейтралью одной из 3 ветвей блока фильтров, представленных в виде схемы звезды. Сопротивление: $X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ и фактор качества: $q = \frac{X_0}{r}$

r = сопротивление реактора, зависящее от определяемое на частоте f_r .

Коэффициент качества фильтра:

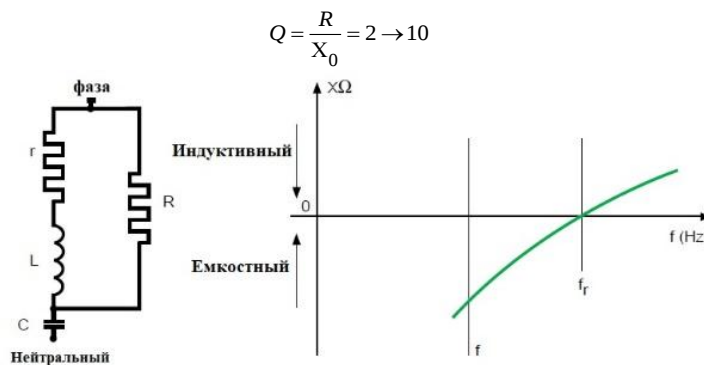


Рис.5. Демпфирующий фильтр 2-го порядка

Демонстрация влияния гармоник, генерируемых в электрических сетях, на метод компенсации реактивной силы. Например, рассчитать параметры трансформаторных фильтров, используемых в электрической сети (рис 6) [5, с.22].

:

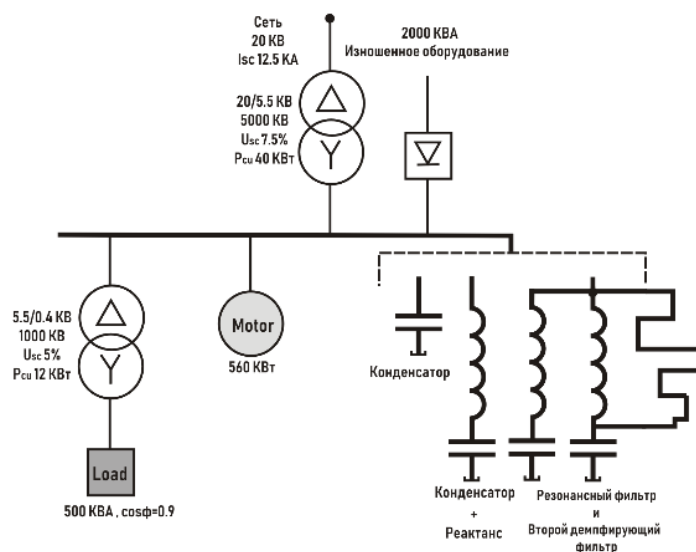


Рис.6. Заданная электрическая сеть

Далее расчет начальных параметров трансформатора. Из рис.6 можно наблюдать первые постоянные параметры трансформатора:

$$U_n=20\text{кВ}, S_n=5000\text{ кВА}, U_{sc}=7,5\%, \\ P_{cu} = 40\text{ кВт}$$

Для расчета магнитного сопротивления (R_m) и индуктивности (L_m) необходимо рассчитать (P_0) и ($i_0\%$) [6, с.129]. Теперь мы можем рассчитать первые параметры трансформатора.

Параметры первичной катушки:

$$R_{T-1} = \frac{P_{sc} \cdot U_1^2}{S_n^2} \cdot 10^3 = \frac{40 \cdot 20^2}{5000^2} \cdot 10^3 = 0,64\text{ Ом}$$

$$X_1 = \frac{U_{sc} \cdot U_1^2}{S_n} \cdot 10 = \frac{7,5 \cdot 20^2}{5000} \cdot 10 = 6\text{ Ом}, \quad (6)$$

$$L_1 = \frac{X}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{6}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,019\text{ Гн}$$

Параметры вторичной катушки:

$$R_{T-2} = \frac{P_{sc} \cdot U_2^2}{(S_n^2)} \cdot 10^3 = \frac{40 \cdot 5,5^2}{5000^2} \cdot 10^3 = 0,0484\text{ Ом}$$

$$X_2 = \frac{U_{sc} \cdot U_2^2}{S_n} \cdot 10 = \frac{7,5 \cdot 5,5^2}{5000} \cdot 10 = 0,453\text{ Ом}, \quad (7)$$

$$L_2 = \frac{X}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,453}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1,441 \cdot 10^{-3}\text{ Гн}$$

Параметры проводимости для трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} G_m &= \frac{P_0}{U_n^2 \cdot 10^3} = \frac{7,88}{20^2 \cdot 10^3} = 1,97 \cdot 10^{-5}\text{ См} \\ B_m &= \frac{i_0 \cdot S_n}{U_n^2 \cdot 10^5} = \frac{0,95 \cdot 5000}{20^2 \cdot 10^5} = 1,1875 \cdot 10^{-4}\text{ См} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\left\{ \begin{aligned} Y &= G_m - jB_m = 1,97 \cdot 10^{-5} - j1,1875 \cdot 10^{-4}\text{ См} \\ Z_m &= R_m + jX_m = 1359,59 + j8195,5\text{ Ом} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

$$L = \frac{X_m}{2\pi \cdot f} = \frac{8195,50}{2\pi \cdot 50} = 26,087\text{ Гн.}$$

Расчет параметров второго трансформатора. На рис.6 можно наблюдать константы второго трансформатора со следующими исходными данными: $U_n = 5,5\text{кВ}$, $S_n = 1000\text{ кВА}$, $U_{sc}\% = 5$, $P_{sc} = 12\text{ кВт}$. Для расчета магнитного сопротивления (R_m) и индуктивности (L_m) необходимо рассчитать (P_0) и ($i_0\%$) [7]:

$$S = 1\text{МВА}, H_v = 5,5\text{ кВ}, L_v = 0,4\text{ кВ}, U_{sc}\% = 5, \\ P_{sc} = 12\text{ кВт}, P_0 = 2,1\text{ кВт}, i_0\% = 1,4.$$

Теперь мы можем рассчитать параметры второго трансформатора:

Параметры первичной катушки:

$$\begin{aligned}
 R_{T-1} &= \frac{P_{sc} \cdot U_1^2}{S_n^2} \cdot 10^3 = \frac{12 \cdot 5,5^2}{1000^2} \cdot 10^3 = 0,363 \text{ Ом} \\
 X_1 &= \frac{U_{sc} \cdot U_1^2}{S_n} \cdot 10 = \frac{5 \cdot 5,5^2}{1000} \cdot 10 = 1,512 \text{ Ом}, \\
 L_1 &= \frac{X}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{1,512}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 4,812 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

Параметры вторичной катушки:

$$\begin{aligned}
 R_{T-2} &= \frac{P_{sc} \cdot U_2^2}{(S_n^2)} \cdot 10^3 = \frac{12 \cdot 0,4^2}{1000^2} \cdot 10^8 = 1,92 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \\
 X_2 &= \frac{U_{sc} \cdot U_2^2}{S_n} \cdot 10 = \frac{5 \cdot 0,4^2}{1000} \cdot 10 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}, \\
 L_2 &= \frac{X}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 2,545 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Параметры проводимости для трансформатора:

$$\left. \begin{aligned}
 G_m &= \frac{P_0}{U_n^2 \cdot 10^3} = \frac{12}{5,5^2 \cdot 10^3} = 3,942 \cdot 10^{-5} \text{ См} \\
 B_m &= \frac{i0 \cdot S_n}{U_n^2 \cdot 10^5} = \frac{1,4 \cdot 1000}{5,5^2 \cdot 10^5} = 4,628 \cdot 10^{-4} \text{ См}
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\left\{ \begin{aligned}
 Y &= G_m - jB_m = 3,942 \cdot 10^{-5} - j4,628 \cdot 10^{-4} \text{ См} \\
 Z_m &= R_m + jX_m = 316,98 + j2113,21 \text{ Ом}
 \end{aligned} \right. \tag{11}$$

$$L = \frac{X_m}{2\pi \cdot f} = \frac{2113,21}{2\pi \cdot 50} = 6,7265 \text{ Гн}.$$

Производятся расчет короткого замыкания (S_{sc}) [8, с.10], сопротивление короткого замыкания (R_{sc}) и индуктивность короткого замыкания (L_{sc}). Из рис. 6 $U_n=20$ [кВ], $I_{sc}=12,5$ КА:

$$\begin{aligned}
 S_{sc} &= U_n \cdot I_{sc} = 20 \cdot 12,5 = 250 \text{ МВА} \\
 \Rightarrow I_{sc} &= \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{sc}} \Rightarrow Z_{sc} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{sc}} \\
 \Rightarrow Z_{sc} &= \frac{U_n^2}{\sqrt{3} \cdot S_{sc}} = \frac{(20)^2}{\sqrt{3} \cdot 250} = 0,923 \text{ Ом} \\
 X_{sc} &= 0,98 \cdot Z_{sc} = 0,98 \cdot 0,923 = 0,904 \text{ Ом} \\
 \Rightarrow L_{sc} &= \frac{X_{sc}}{2\pi \cdot f} = \frac{0,904}{2\pi \cdot 50} = 2,879 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \\
 r_{sc} &= 0,2 \cdot Z_{sc} = 0,2 \cdot 0,923 = 0,1846 \text{ Ом}.
 \end{aligned} \tag{12}$$

Расчет реактивной мощности, подлежащей компенсации в этой сети из рис.6:

$$\begin{aligned} P_L &= S_L \cdot \cos \varphi_1 = 500 \cdot 0,9 = 450 \text{ кВт} \\ Q_L &= S_L \cdot \sin \varphi_1 = 500 \cdot 0,435 = 217,5 \text{ кВАр} \end{aligned} \quad (13)$$

Параметры и расчет двигателя со следующими данными $P_n=560$ кВт, $\eta=0,92$, $PF=0,8$:

$$\begin{aligned} P_m &= \frac{P_n}{\eta} = \frac{560}{0,92} = 608,69 \text{ кВт} \\ S_m &= \frac{P_{in}}{\cos \varphi_2} = \frac{608,69}{0,8} = 760,8 \text{ кВА} \\ Q_m &= S_m \cdot \sin \varphi_2 = 760,8 \cdot 0,6 = 456,48 \text{ кВАр.} \end{aligned} \quad (14)$$

Параметры и расчет изношенного оборудования с параметрами $S=2000$ кВА, $PF=0,98$:

$$\begin{aligned} P_D &= S_D \cdot \cos \varphi_3 = 2000 \cdot 0,98 = 1960 \text{ кВт} \\ Q_D &= S_D \cdot \sin \varphi_3 = 2000 \cdot 0,199 = 397,99 \text{ кВАр} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Sigma Q &= Q_L + Q_m + Q_D \\ \Sigma Q &= 217,5 + 456,48 + 397,99 = 1071,97 \text{ кВАр.} \end{aligned} \quad (16)$$

Реактивная мощность, подлежащая компенсации:

$$Q_C = 1000 \text{ кВАр.}$$

Схема питания для электрической сети (рис 7):

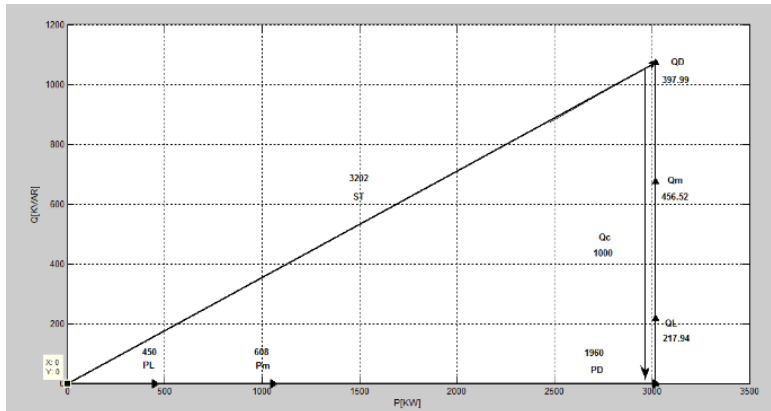


Рис.7. Схема питания для электрической сети

Методы компенсации реактивной мощности [7,8]. Только статическая конденсаторная батарея подходит для компенсации реактивной мощности (рис 8):

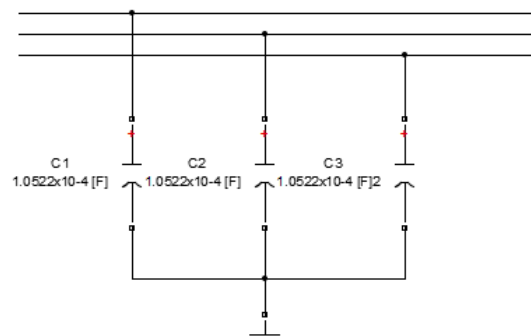


Рис.8. Банк конденсаторов компенсирует соединившись как (λ)

Реактивная мощность, которую требуется компенсировать от батареи конденсаторов, равна $Q_c = 1000$ кВАр. Поскольку нагрузка трехфазная и сбалансированная, конденсаторы будут подключены к стержню, к которому подключено устройство подавления гармонических помех 5,5 кВ. Далее нам следует рассчитать:

Емкость компенсации реактивной мощности [9-12] одной фазы:

$$C = \frac{Q_{var,ph}}{U_{ph}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1} = \frac{1000}{5,5^2 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 1,0522 \cdot 10^{-4} \text{ Ф} \quad (17)$$

Индуктивность короткого замыкания вторичной катушки:

$$L_{sc,2} = K^2 \cdot L_{sc,1} = \left(\frac{5,5^2}{20} \right) \cdot 2,879 \cdot 10^{-3} = 2,178 \cdot 10^{-4} \text{ Гн.} \quad (18)$$

Антирезонансная частота:

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_{SC} + L_T) \cdot C}} \quad (19)$$

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi \sqrt{1,652 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0522 \cdot 10^{-4}}} = 381,56 \text{ Гц.}$$

Порядок антирезонанса:

$$n_{ar} = \frac{f_{ar}}{f_1} \quad (20)$$

$$n_{ar} = \frac{381,56}{50} = 7,63.$$

В данный момент рассматривается вариант подключенной к реактору конденсаторная батарея для компенсации реактивной мощности (рис 9):

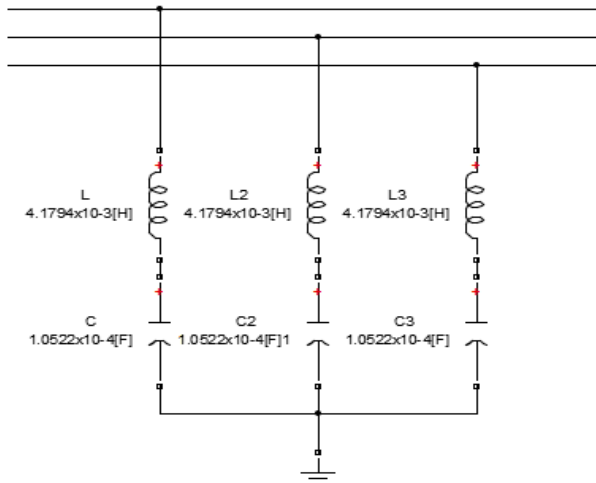


Рис.9. Банк конденсаторов компенсирует с помощью индуктивностей, подключенные (λ)

Это оборудование произвольно настроено на:

$$\begin{aligned} f_r &= 4,8 \cdot f_1 \\ f_r &= 4,8 \cdot 50 = 240 \text{ Гц} \end{aligned} \quad (21)$$

Индуктивность, связанная с компенсацией конденсатора:

$$L = \frac{1}{(2\pi)^2 \cdot f_r^2 \cdot C} \quad (22)$$

$$L = \frac{1}{(2\pi)^2 \cdot (4,8)^2 \cdot 1,0522 \cdot 10^{-4}} = 4,1794 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

Резонансный шунтирующий фильтр, настроенный на 5-ю гармонику, и демпфирующий фильтр, настроенный на 7-ю гармонику. В этом случае распределение реактивной мощности между двумя фильтрами таково, что отфильтрованные 5-я и 7-я гармоники напряжения имеют примерно одинаковое значение (рис 10):

$$Q_{var,rf} = Q_{var,df} = 500 \text{ кВАр} \quad (23)$$

$$Q_{var} = 500 \text{ кВАр}$$

$$n_r = 7$$

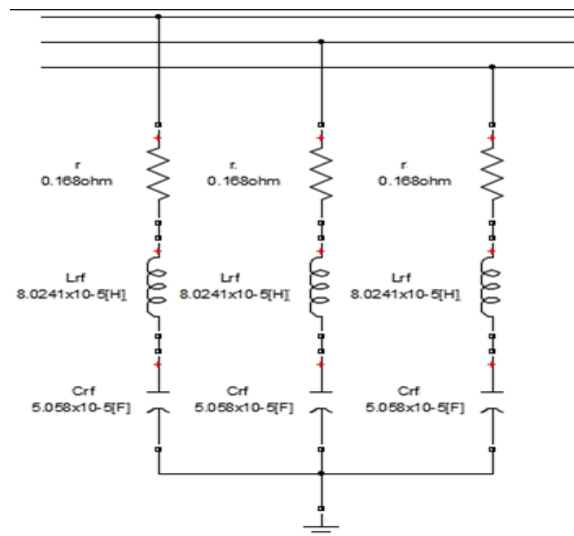


Рис.10. Резонансный шунтирующий фильтр, настроенный на 5-ю гармонику

$$C = \frac{Q_{var}}{\frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} \cdot U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1}$$

$$C = \frac{500}{\frac{5^2}{58^2 - 1} \cdot (100\sqrt{3})^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 5,0508 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$$

$$f_r = n_r \cdot f_1 = 5 \cdot 50 = 250 \text{ Гц}$$

$$L = \frac{1}{(2\pi)^2 \cdot f_r^2 \cdot C} = \frac{1}{(2\pi)^2 \cdot (50)^2 \cdot 5,0508 \cdot 10^{-5}} = 8,0241 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{8,0241 \cdot 10^{-3}}{5,0508 \cdot 10^{-5}}} = 12,604 [\Omega] \Rightarrow r = \frac{X_0}{Q} = \frac{12,604}{75} = 0,168 \text{ Ом.} \quad (24)$$

Порядок резонанса с учетом коэффициента качества фильтра (рис. 11), где $Q = 75$

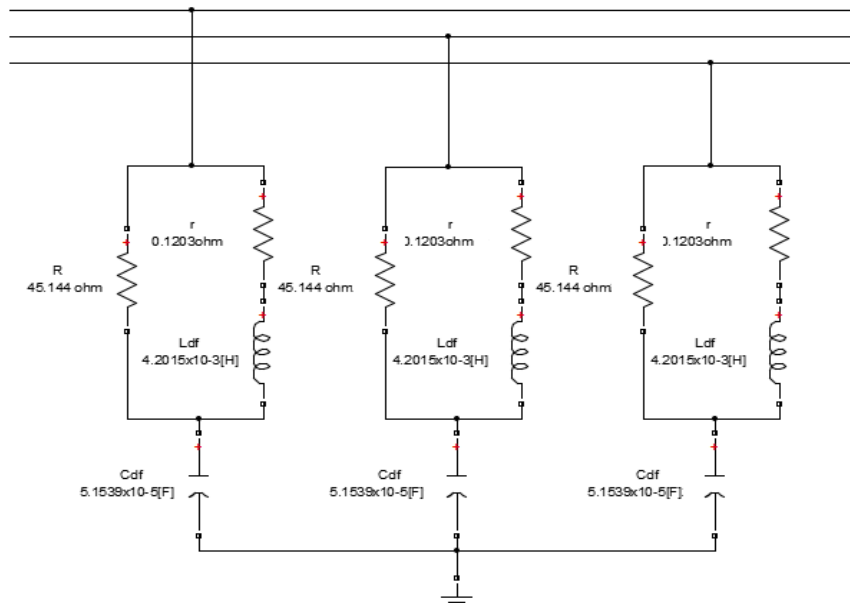


Рис.11. Демпфирующий фильтр, настроенный на 7-ю гармонику

Порядок резонанса с коэффициента качества реактора:

$$q = \frac{1}{pss - band} = 75 \quad (25)$$

Коэффициент качества фильтра, где:

$$C = \frac{Q_{var}}{\frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} \cdot U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_1}$$

$$C = \frac{500}{\frac{7^2}{7^2 - 1} \cdot (100\sqrt{3})^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = 5,1539 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$$

$$f_r = n_r f_1 = 7 \cdot 50 = 350 \text{ Hz}$$

$$L = \frac{(1 + Q \cdot q)^2}{(2\pi \cdot q)^2 \cdot (Q^2 - 1)^2 \cdot f_r^2 \cdot C}$$

$$L = \frac{(1 + 5 \cdot 75)^2}{(2\pi \cdot 75)^2 \cdot (5^2 - 1) \cdot 350^2 \cdot 5,1539 \cdot 10^{-5}} = 4,2075 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{4,2075 \cdot 10^{-3}}{5,1539 \cdot 10^{-5}}} = 9,028 [\Omega] \Rightarrow r = \frac{X_0}{q} = \frac{9,028}{75} = 0,12 \text{ Ом}$$

$$R = X_0 \cdot Q = 9,028 \cdot 5 = 45,144 \text{ Ом.}$$
(26)

Моделирование электрической сети с использованием *MATLAB* [13, 14] и анализ различных вариантов компенсации реактивной мощности:

Рис.12 иллюстрирует моделирование электрической сети с использованием *MATLAB*, где мы ввели: параметры (Первый трансформатор – Второй трансформатор – Двигатель – Тревога – Нагрузка).

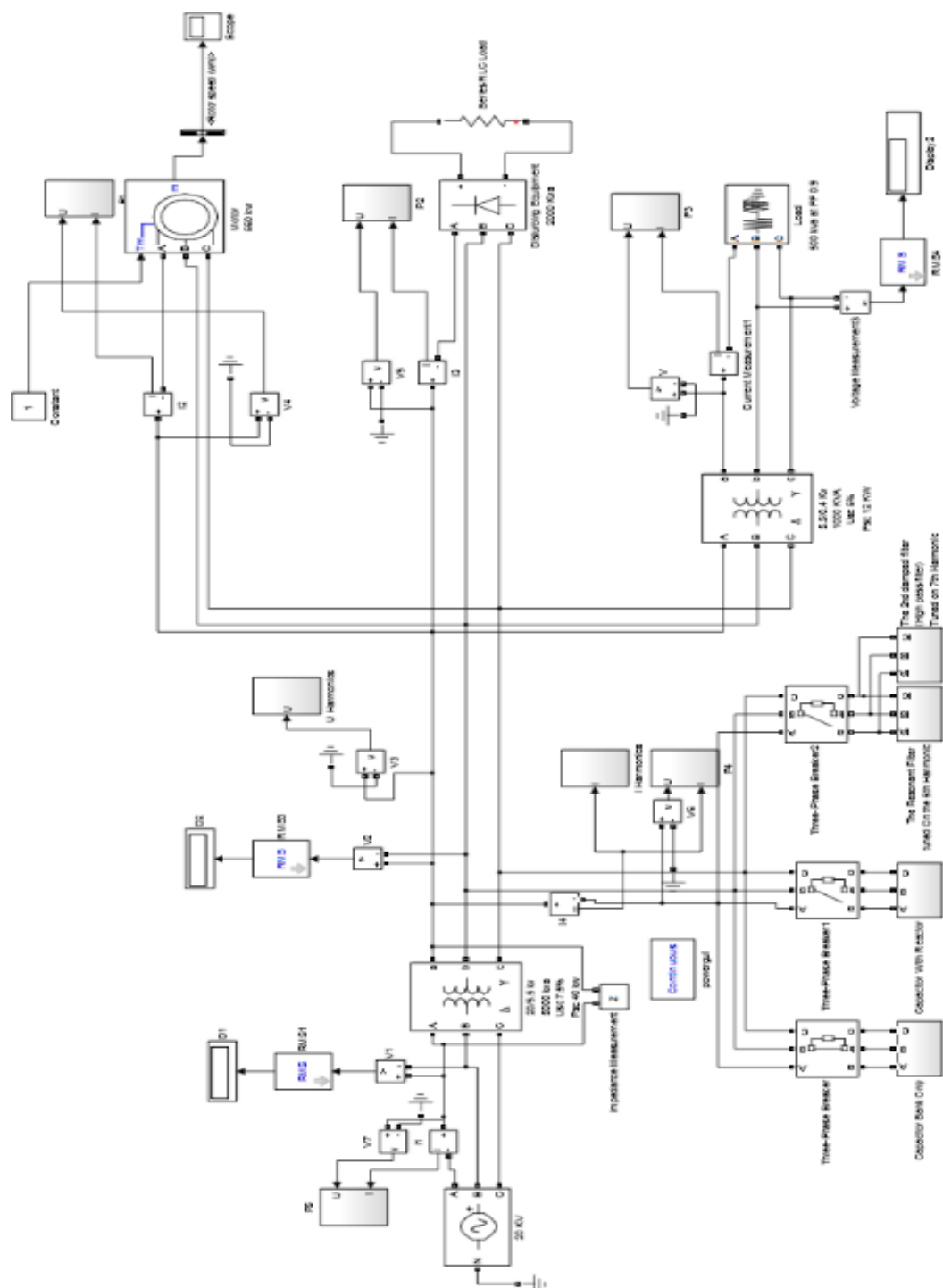


Рис.12. Моделирование электрической сети

Далее анализируются различные случаи компенсации. Конденсаторная батарея наиболее подходит для компенсации реактивной мощности:

На рис.13 приведена кривая сопротивления сетки к углу гармоник, видимому из узла, куда вводятся гармонические токи, демонстрирует максимум (антирезонансный) в окрестности 7-го тока (рис. 14).

Таблица 1

Величины гармонических напряжений						
Номера гармоник	3	5	7	9	11	13
Величина напряжения, %	0,02	8,21	11	0,22	2,8	1,4

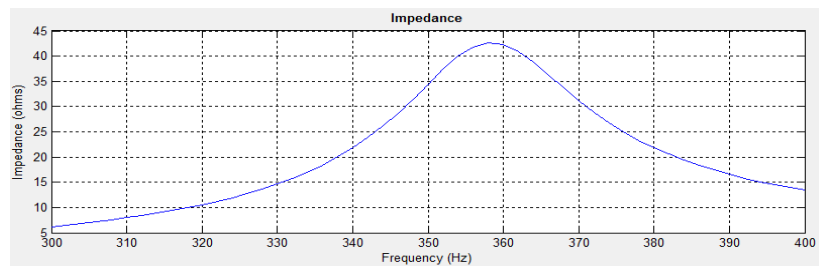


Рис.13. Кривая гармонического сопротивления сети

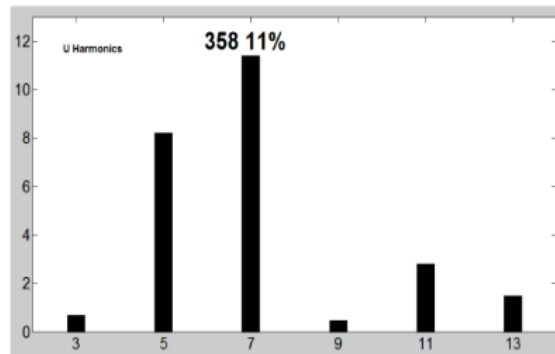


Рис.14. Гармонический спектр напряжения сети 5,5 кВ.

Это приводит к недопустимому искажению напряжения отдельной гармоники в 11% для 7-й гармоники (рис.15).

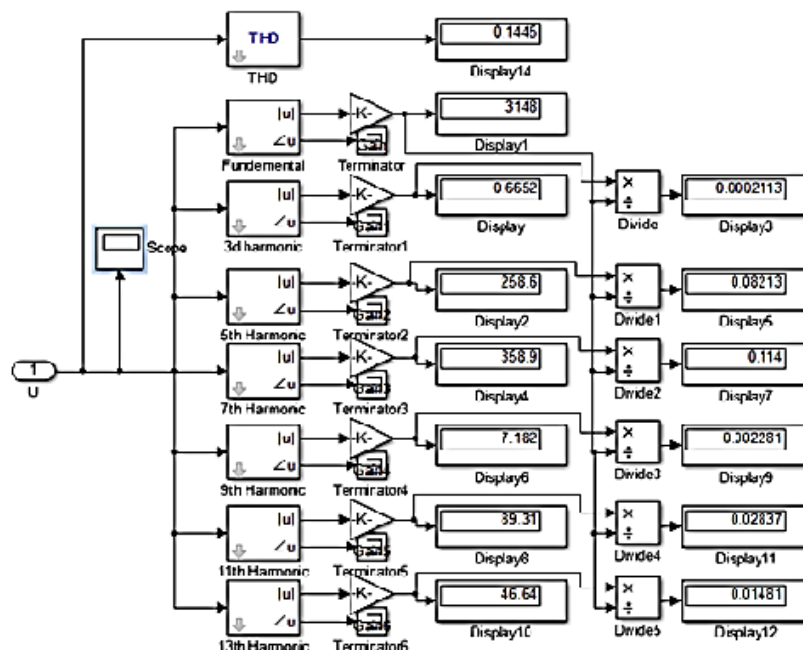


Рис.15. Значение общего гармонического искажения (ЗОГИ)

Следующие характеристики также недопустимы. Из рис.15 общее гармоническое искажение напряжения 14,25% для 5,5 кВ сети. По сравнению с максимально допустимым значением 5%. Этот процент недопустим. Поэтому решение только с конденсаторами неприемлемо [15]. Подключенная к реактору конденсаторная батарея для компенсации реактивной мощности. Это оборудование произвольно настроено на:

$$f_r = 4,8 \cdot f_1 = 4,8 \cdot 50 = 240 \text{ Hz}.$$

На рис. 16 показана кривая сопротивления гармоник сети, видимая из узла, в который вводятся гармонические токи (рис. 17), максимум 23 Ом (антирезонансный) в окрестности 4-го тока.

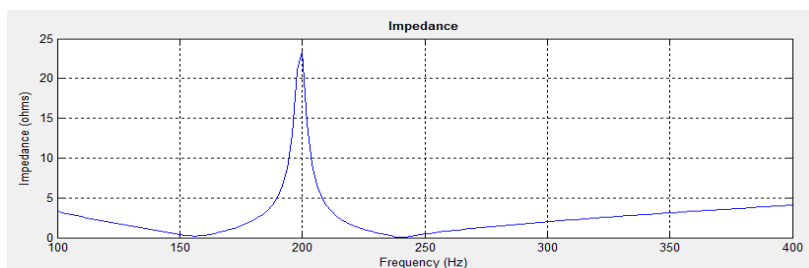


Рис.16. Кривая гармонического сопротивления сети (КГСС)

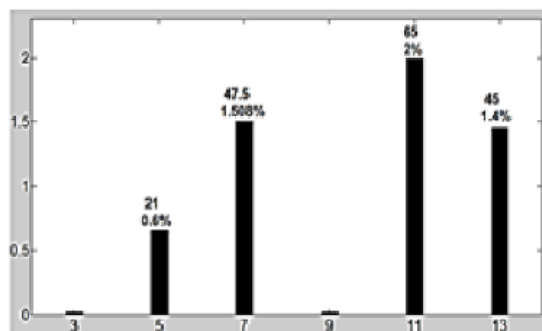


Рис.17. Гармонический спектр напряжения сети 5,5 кВ

Таблица 2

Величины гармонических напряжений						
Номера гармоник	3	5	7	9	11	13
Величина напряжения, %	0,012	0,60	1,508	0,031	2	1,4

Для сети 5,5 кВ коэффициенты напряжения отдельных гармоник, равные 1,508% (7-я гармоника), 2% (11-я гармоника) и 1,4% (13-я гармоника), могут быть слишком высокими для определенных чувствительных нагрузок.

Из рис.18 допустимо общее искажение гармонического напряжения 3,4%. Резонансный шунтирующий фильтр, настроенный на 5-ю гармонику, и демпфирующий фильтр, настроенный на 7-ю гармонику:

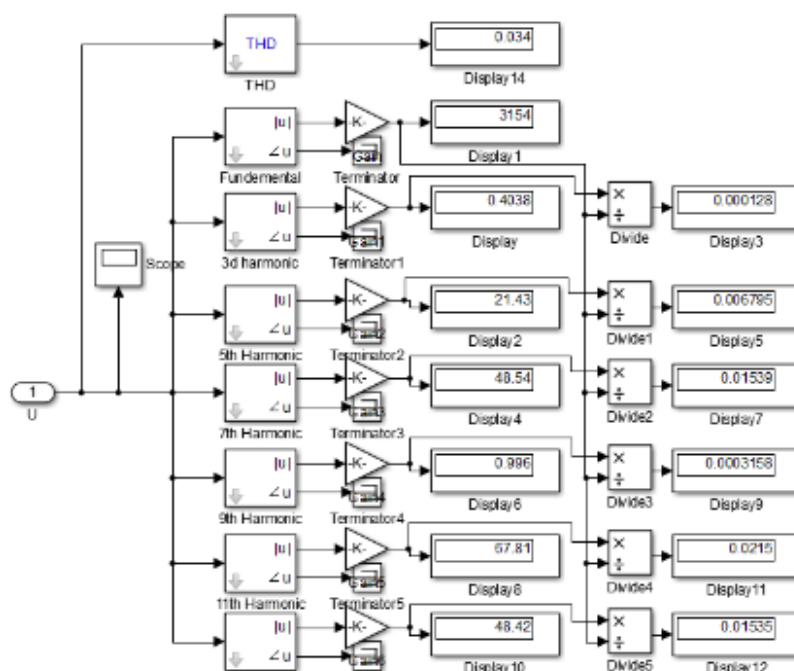


Рис.18. Значение общего гармонического искажения (ЗОГИ)

На рис.19 показана кривая сопротивления гармоник сети, видимая из узла, где вводятся гармонические токи, максимум 14 Ом (антирезонансный) в окрестности 4-го тока.

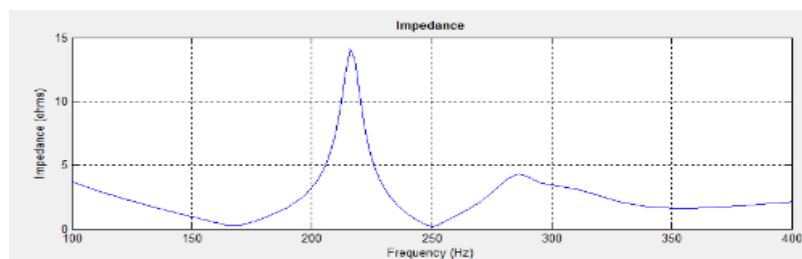


Рис.19. Кривая гармонического сопротивления сети

Для 5-й гармоники этот импеданс уменьшается до сопротивления реактора. Для 7-й гармоники низкий, чисто резистивный импеданс демпфирующего фильтра также снижает напряжение отдельной гармоники. Для гармоник выше частоты настройки кривая сопротивления демпфирующего фильтра уменьшает соответствующие гармонические напряжения. Это оборудование, следовательно, предлагает улучшение по сравнению со вторым решением (конденсаторы с реакторным подключением) (рис.20).

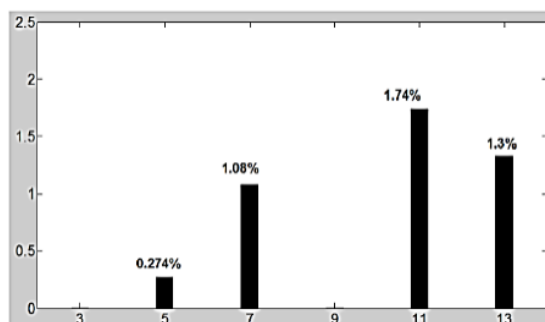


Рис.20. Гармонический спектр напряжения сети 5,5 кВ

Таблица 3

Величины гармонических напряжений						
Номера гармоник	3	5	7	9	11	13
Величина напряжения, %	-	0,274	1,08	-	1,74	1,3

Для сети 5,5 кВ коэффициенты напряжения отдельных гармоник, составляющие 0,274% (5-гармоническая), 1,08% (7-я гармоника), 1,74% (11-я гармоника) и 1,3% (13-я гармоника), могут быть слишком высокими для большинства чувствительных нагрузок.

Из рис. 21 допустимо общее искажение напряжения в 3,6%.

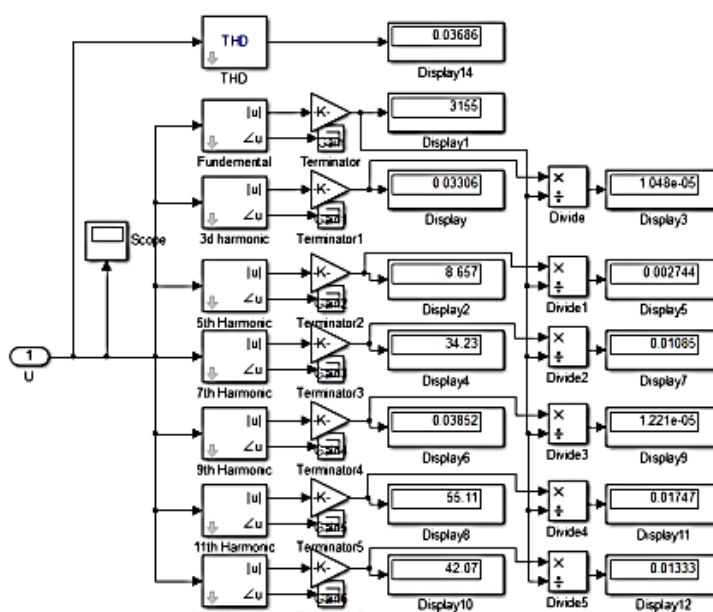


Рис.21. Значение полного гармонического искажения (ЗОГИ)

Выводы

В случае электрических сетей, где (КГСС) меньше (5%), реактивная мощность может быть компенсирована напрямую посредством конденсаторной батареи для компенсации реактивной мощности.

В случае электрических сетей, где (КГСС) больше (5%), фильтры должны быть размещены параллельно с конденсаторной батареей для компенсации реактивной мощности.

Фильтры следует использовать для удаления электрических сетей от гармонических электрических устройств и компенсационных конденсаторов.

Литература

1. Osama Ibrahim and Muhammed Sefer. Performance Evaluation of Harmonics on Power Quality, <https://www.researchgate.net>, 2016.
2. Harmonics in power systems, Siemens Industry USA, 2013, pp:24.
3. Zia Hameed, Muhammad Sial and Adnan Yousaf. Harmonics in Electrical Power Systems and how to remove them by using filters in ETAP // Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering & Emerging Technologies, 2016.
4. TaufikTaufik. Introduction to Harmonics in Power System, <https://www.researchgate.net>, 2018.
5. Christian Collombet, Jean Marc Lupin and Jacques Schonek. Harmonic Disturbances in Networks and their Treatment, Schneider Electric, Germany, 1999, pp. 31.
6. Al-Quai Farouk. Analysis of Electrical Networks, Syria-University of Al-Baath, 2006, pp.587.
7. The Methods of Reactive Power Compensation in the 25 Kv,50 Hz Contact Network, Vilnius Gediminas Technical University, 2018.
8. De Metz Noblat, Frederic Dumas and Christophe Poulain. Calculation of Short Circuit Currents. Schneider Electric, 2005, pp:35
9. Paolo Tenti, Paolo Mattavelli and Elisabetta Tedeschi. Compensation Techniques Based on Reactive Power Conservation. Journal Electrical Power Quality and Utilisation. 2007.
10. RoosF and BansalR.C. Reactive Power and Harmonic Compensation: A Case Study for the Coal Mining industry. Journal of Energy in Southern Africa. 2019.
11. Zahid Hassan and Gagan Deep Yadav. Reactive Power Compensation and Limiting Harmonic Current Using Shunt Active Power Filter // International Journal of Trend in Scientific Research and Development, 2018.
12. Sarvesh Gadre and Praveen Iyer. Reactive Power Compensation by Using FACTS Devices under Non-Sinusoidal Condition by Using MATLAB Simulation // International Journal for Scientific Research & Development, 2015.
13. Swapnil Sharma and Dikesh Patel. Modelling and Simulation of FC-TCR for Reactive Power Compensation Using the MATLAB. Simulink // International Journal of Advances in Engineering & Technology, 2015.
14. Sree K., Latha and M. Vijayakumar. Implementation of FC-TCR for Reactive Power Control // Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2013.
15. Blooming T.M. and Carnovale D.J. Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits, <https://www.researchgate.net>, 2005.

Авторы публикации

Альзаккар Ахмад Мухаммед Насер – аспирант, Казанский государственный энергетический университет.

Валеев Ильгиз Миргалимович – д-р. техн. наук, Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Osama. Ibrahim and Muhammed Sefer. *Performance Evaluation of Harmonics on Power Quality*, <https://www.researchgate.net>, 2016.
2. *Harmonics in power systems*, Siemens Industry USA, 2013, pp:24.
3. Zia Hameed, Muhammad Sial and Adnan Yousaf. Harmonics in Electrical Power Systems and how to remove them by using filters in ETAP, *Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering & Emerging Technologies*, 2016.
4. TaufikTaufik. *Introduction to Harmonics in Power System*, <https://www.researchgate.net>, 2018.

5. Christian Collombet, Jean Marc Lupin and Jacques Schonek. *Harmonic Disturbances in Networks and their Treatment*, Schneider Electric, Germany, 1999, pp. 31.
6. Al-Quai Farouk. *Analysis of Electrical Networks*, Syria-University of Al-Baath, 2006, pp:587.
7. The Methods of Reactive Power Compensation in the 25 Kv,50 Hz Contact Network, Vilnius Gediminas Technical University, 2018.
8. De Metz Noblat, Frederic Dumas and Christophe Poulain. *Calculation of Short Circuit Currents*. Schneider Electric, 2005, pp:35
9. Paolo Tenti, Paolo Mattavelli and Elisabetta Tedeschi. Compensation Techniques Based on Reactive Power Conservation. *Journal Electrical Power Quality and Utilisation*. 2007.
10. Roos F and Bansal R.C. Reactive Power and Harmonic Compensation: A Case Study for the Coal Mining industry. *Journal of Energy in Southern Africa*.2019.
11. Zahid Hassan and Gagan Deep Yadav. Reactive Power Compensation and Limiting Harmonic Current Using Shunt Active Power Filter. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 2018.
12. Sarvesh Gadre and Praveen Iyer. Reactive Power Compensation by Using FACTS Devices under Non-Sinusoidal Condition by Using MATLAB Simulation. *International Journal for Scientific Research & Development*, 2015.
13. Swapnil Sharma and Dikesh Patel. Modelling and Simulation of FC-TCR for Reactive Power Compensation Using the MATLAB. Simulink. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 2015.
14. Sree K., Latha and. Vijayakumar M. Implementation of FC-TCR for Reactive Power Control. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2013.
15. Blooming T.M and Carnovale D.J. *Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits*, <https://www.researchgate.net>, 2005.

Authors of the publication

Alzakkar Ahmad Muhammad Nasser – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
Email:ahmadalzakkar86@gmail.com.

Ilgiz M. Valeev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

25 мая 2019г.