

Method for Determining the Operating Characteristics of Frequency Converter Using Interphase Power Controller Technology

Kaloshin D.N.

Institute of Power Engineering
Chisinau, Republic of Moldova

Abstract. The object of the study is a frequency converter based on IPC technology. The purpose of the study is to determine the device's performance characteristics by means of a mathematical apparatus describing the area of existence of operating modes for active and reactive power. On the basis of combinatorial laws, variants of non-repeating states of thyristor keys were obtained. The initial phases of active and reactive power components are determined by varying in accordance with the cosine law with two non-repeating combinations of key switching on each pair of conjugate reactive elements. The input of two constants made it possible to simplify the arguments influencing the magnitude and direction of the transmitted power by the device. A comparative analysis of the regime parameters and the characteristics obtained with the help of the simulation model and calculated by the proposed method confirms the identity of the results. The error of the method fluctuates between 0.5% and 1.5%. The developed method made it possible to determine a number of unique variants of the transmitted power level when adjusting the angle δ_{sr} in the range $0^\circ \div 360^\circ$. This allows to adjust the magnitude and direction of the transmitted power when "sliding" or slow and arbitrary frequency changes. Thus, the proposed method made it possible to determine with a high degree of accuracy the domain of existence of the regime parameters with the construction of switching diagrams of keys to maintain an ordered unidirectional power flow with frequency matching by the device under study.

Keywords: multimodular frequency converter, interphase power controllers (IPC), power flow.

DOI: 10.5281/zenodo.1217278

Metodă pentru determinarea caracteristicilor de frecvență ale unui convertor de frecvență care utilizează tehnologia Interfase Power Controller

Caloșin D. N.

Institutul de Energetică, Chisinau, Republica Moldova

Rezumat. Obiectul studiului este un convertor de frecvență bazat pe tehnologia IPC, construită în conformitate cu schema hexagonală regulată. Scopul studiului este de a dezvolta o metodă pentru determinarea caracteristicilor de performanță ale dispozitivului prin intermediul unui aparat matematic care descrie aria de existență a regimurilor de funcționare a energiei active și reactive. Pe baza legilor combinatoriale s-au obținut variante de stări non-repetate ale cheilor electronice de putere. Se determină fazele inițiale ale componentelor de putere activă și reactivă, variind în conformitate cu legea cosinusului cu două combinații de incluziuni cheie nerecurente pe fiecare pereche de elemente reactive conjugate. Introducerea a două constante a făcut posibilă simplificarea argumentelor care influențează magnitudinea și direcția puterii transmise de dispozitiv. O analiză comparativă a parametrilor regimului și a caracteristicilor obținute cu ajutorul modelului de simulare și calculată prin metoda propusă confirmă identitatea rezultatelor. Eroarea metodei variază între 0,5% și 1,5%. Metoda dezvoltată a făcut posibilă determinarea unui număr de variante unice în ceea ce privește nivelul puterii transmise, atunci când se reglează unghiul δ_{sr} în intervalul de $0^\circ \div 360^\circ$. Acest lucru face posibilă reglarea magnitudinii și a direcției puterii active și reactive transmise la "alunecare" sau schimbarea lentă și arbitrară a frecvenței. Astfel, metodologia propusă în lucrare ne permite să determinăm cu un grad înalt de precizie regiunile existenței parametrilor regimului prin construirea diagramelor de comutație pentru a menține un flux unidirecțional comandat de puteri active și reactive, când frecvența este racordată de către convertorul de frecvență realizat pe baza IPC.

Cuvinte-cheie: convertor de frecvență multimodular, controlere de putere interfazice, fluxul de putere.

Способ определения режимных характеристик преобразователя частоты, использующего технологию Interphase Power Controller

Калошин Д.Н.

Институт энергетики
Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Объектом исследования является преобразователь частоты на основе параметрического регулятора мощности построенного по схеме правильного шестиугольника. Цель исследования

заключается в разработке способа определения режимных характеристик, преобразователя частоты на базе технологии ИРС посредством математического аппарата, описывающего область существования режимов работы по активной и реактивной мощности. На основании законов комбинаторики получены варианты неповторяющихся состояний ключей силовой электроники. Определены начальные фазы активных и реактивных составляющих мощности, изменяющейся по косинусоидальному закону при двух неповторяющихся комбинациях включения ключей на каждой паре сопряженных реактивных элементов. Ввод двух постоянных позволил упростить аргументы, оказывающие влияние на величину и направление передаваемой активной и реактивной мощности преобразователем частоты между передающей и приемной системами. Сравнительный анализ режимных параметров и характеристик, полученных с помощью имитационной модели и рассчитанных на основе предлагаемого математического аппарата, подтверждает тождественность результатов. При этом погрешность предлагаемого расчетного метода колеблется в пределах от 0,5% до 1,5%. Разработанный математический аппарат позволил определить ряд уникальных вариантов по уровню передаваемой мощности, при регулировании угла δ_{sr} в пределах диапазона $0^\circ \div 360^\circ$. Это позволяет осуществить регулирование величины и направления передаваемой активной и реактивной мощности при «сползании», или медленном и произвольном изменении частоты между передающей и приемной системами. Таким образом, предложенный в работе способ определения режимных характеристик позволяет с высокой степенью точности определять области существования режимных параметров с построением диаграмм переключения ключей силовой электроники для поддержания упорядоченного однонаправленного потока активных и реактивных мощностей при согласовании частоты исследуемым преобразователем частоты на основе параметрического регулятора мощности ИРС.

Ключевые слова: многомодульный преобразователь частоты, источник неизменного тока (Interphase Power Controller), поток мощности.

Введение

Общая картина распределения потоков мощности, в ветвях транспортных сетей объединенных энергосистем определяется величиной угла фазового сдвига между напряжениями на передающем и приемном конце каждой ЛЭП. Любые колебания этого угла сопровождаются соответствующими колебаниями уровня передаваемой по линии активной мощности. Такие колебания могут приводить к неблагоприятным для объединенных энергосистем последствиям.

Недавно появившаяся технология ИРС позволяет решить вопрос уровня передаваемой по линии активной мощности и локализовать распространение колебательных процессов в транспортных сетях электрических систем, о чем свидетельствуют результаты исследований, представленные в [1-23].

Так в [1-16] рассматривается вопрос применения технологии ИРС в качестве устройства UIPC (*Unified Interphase Power Controller*) обладающего большим диапазоном управления активной и реактивной составляющей мощности, DCIPC (*Dynamic Controlled Interphase Power Controller*) являющийся статическим устройством так же обладающего свойствами надежного управления потоком активной и реактивной мощности.

В [20] рассматривается новый вариант адаптивного контроллера на основе технологии ИРС без применения специальных фазорегулирующих трансформаторов и обладающего широким диапазоном управления.

В данной статье представлен разработанный способ, позволяющий математическим путем определить режимные характеристики преобразователя частоты [20] в условиях произвольного изменения угла фазового сдвига между напряжениями шин передающей и принимающей системы, для данного устройства. Также рассмотрена возможность реализации данного устройства в качестве преобразователя частоты, позволяющего в процессе согласования частоты обеспечить достаточно стабильный процесс регулирования уровня передаваемой мощности.

I. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Электрическая схема преобразователя частоты с применением трансформаторов соединенных по схеме правильного шестиугольника представлена на рис.1 представляет собой силовые трансформаторы, подключенные к передающей и приемной системам.

Система вторичных обмоток каждого трансформатора связана со своим набором элементарных (LC) модулей, а через них с

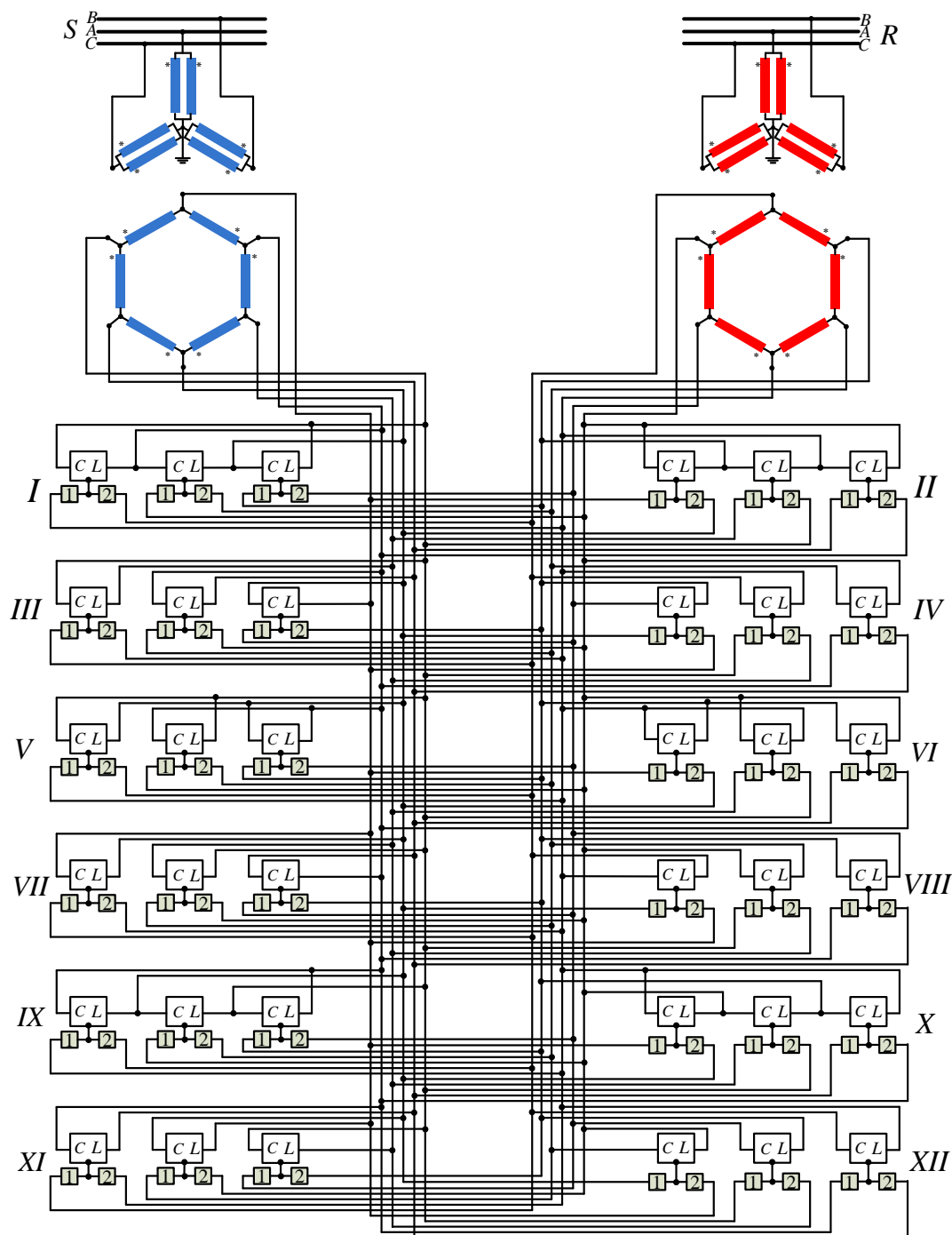


Рис.1. Электрическая схема преобразователя частоты.

узлами вторичных обмоток (вершины шестиугольника) другого трансформатора.

Принцип работы элементарного модуля преобразователя и сущность протекающих электрических процессов описаны в [20].

Векторная диаграмма, поясняющая работу модуля представлена на рис.2.

Показанные на данном рисунке элементы схемы, электрические величины и их обозначения имеют следующий смысл:

– L, C - сопряженные реактивные элементы,

– I_{B1}, I_{B2} - токи собственных проводимостей сопряженных реактивных элементов,

– U_{B1}, U_{B2} - напряжения, прикладываемые к проводимостям сопряженных реактивных элементов,

– I_s, I_r - токи на входе и выходе элементарного модуля преобразователя,

– U_s, U_r - напряжения на входе и выходе элементарного модуля преобразователя,

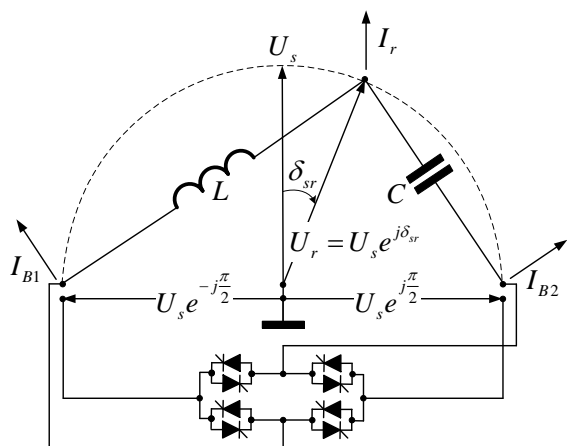


Рис.2. Векторная диаграмма элементарного модуля.

– δ_{sr} - угол фазового сдвига между напряжениями U_s и U_r , обусловленный наличием частоты скольжения между передающей и приемной электрическими системами.

При этом отдельные элементарные модули образуют трехфазные блоки, пронумерованные римскими цифрами ($I \div XII$). Нечетные номера блоков относятся к системе S , четные - к системе R .

В результате реализации указанных схемных соединений, ток, поступающий в каждый узел шестиугольника вторичных обмоток трансформатора приемной системы, оказывается суммой токов шести элементарных модулей питающей системы.

Аналогичным образом, ток, оттекающий от каждого узла шестиугольника вторичных обмоток трансформатора передающей системы, становится суммой токов шести элементарных модулей приемной системы.

Также следует отметить, что модули (I, II, V, VI, IX, X) включены на линейное напряжение и условно будут именоваться элементами первого рода, а модули ($III, IV, VII, VIII, XI, XII$) – на двойное фазное напряжение, элементами второго рода.

Опираясь на вышеизложенный материал, была создана и отлажена имитационная модель с номинальным напряжением модели 230V и рабочим током 12A.

Расчеты, выполненные моделью, посредством перебора различных комбинаций включения ключей на

устройстве позволили определить область, состоящую из 361 варианта уникальных значений, передаваемых активных и реактивных мощностей. Данная область графически представлена в [20].

II. РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ, МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель исследования заключалась в разработке математического аппарата, описывающего область существования режимов работы многомодульного преобразователя частоты по активной и реактивной мощности. На основе закона комбинаторики было определено число возможных неповторяющихся комбинаций включения ключей A_n^k определяющееся по формуле:

$$A_n^k = n^k \quad (1)$$

где k – количество сопряженных реактивных элементов;
 n – количество неповторяющихся комбинаций включения ключей для одного модуля (положение ключа на модуле).

Для модели преобразователя частоты представленного на рис. 1, оснащенного двенадцатью модулями с сопряженными реактивными элементами (k), которые, в свою очередь, оснащены двумя управляемыми ключами силовой электроники (n), позволяющих изменять направление перетока мощности между передающей и приемной системами, получены 4096 неповторяющихся комбинаций включения ключей.

В свою очередь, каждый сопряженный реактивный элемент обладает амплитудным значением передаваемой активной (P) и реактивной (Q) мощности, изменяющейся по косинусоидальному закону с начальной фазой.

Начальная фаза активной и реактивной составляющих при двух неповторяющихся комбинациях включения ключей на каждой паре сопряженных реактивных элементах представлены в таблице 1.

Согласно таблицы 1 мгновенное значение передаваемой активной и реактивной мощности через первый модуль, в

зависимости от комбинации включенных ключей, а так же с учетом начальной фазы и угла δ_{sr} , можно определить по следующим формулам:

$$P_n^I = P \cdot \cos(\delta_{sr} - 0^\circ - 1^\circ), \text{ при } n = 1 \quad (2)$$

$$Q_n^I = 2,5 + Q \cdot \cos(\delta_{sr} - 270^\circ - 1^\circ), \text{ } n = 1 \quad (3)$$

где P - амплитудное значение активной составляющей модуля;
 Q - амплитудное значение реактивной составляющей модуля.

Таблица 1

Начальная фаза активной и реактивной составляющих, в зависимости от положения ключей.

Модуль	Активная мощность (P)		Реактивная мощность (Q)	
	Положение ключей на модуле, n		Положение ключей на модуле, n	
	1	2	1	2
элементы первого рода				
<i>I</i>	0°	180°	270°	90°
<i>II</i>	0°	180°	270°	90°
<i>V</i>	60°	240°	330°	150°
<i>VI</i>	60°	240°	330°	150°
<i>IX</i>	120°	300°	30°	210°
<i>X</i>	120°	300°	30°	210°
элементы второго рода				
<i>III</i>	210°	30°	120°	300°
<i>IV</i>	210°	30°	120°	300°
<i>VII</i>	270°	90°	180°	0°
<i>VIII</i>	270°	90°	180°	0°
<i>XI</i>	330°	150°	240°	60°
<i>XII</i>	330°	150°	240°	60°

Следует отдельно отметить, что все полученные начальные фазы активной и реактивной составляющих на модулях получены с учетом начального угла отстройки модели на передающей системе (S). Начальный угол отстройки модели составляет $359^\circ (-1^\circ)$.

Выражения 2 и 3 можно представить в общем виде введя две постоянные:

$$\psi = \frac{\pi}{6} - \text{угол фазового сдвига на}$$

сопряженных реактивных элементах;

$$\alpha = -1^\circ - \text{угол отстройки устройства.}$$

Подставив постоянные, получим следующий вид выражений 2 и 3:

$$P_n^I = P \cdot \cos(\delta_{sr} - 12\psi + \alpha), \text{ } n = 1 \quad (4)$$

$$Q_n^I = 2,5 + Q \cdot \cos(\delta_{sr} - 9\psi + \alpha), \text{ } n = 1 \quad (5)$$

Аналогичным образом можно определить величину и направление передаваемой активной и реактивной мощности для всех остальных модулей в зависимости от аргументов, приведённых в таблице 2 и 3.

На основании таблиц 2 и 3 представляется возможным определить величину и направление передаваемой активной и реактивной мощности устройством в зависимости от комбинации включения ключей на модулях и угла δ_{sr} , по следующим формулам:

$$P_m = P_n^I + P_n^{II} + P_n^{III} + P_n^{IV} + P_n^V + P_n^{VI} + P_n^{VII} + P_n^{VIII} + P_n^{IX} + P_n^X + P_n^{XI} + P_n^{XII} \quad (6)$$

где m - номер комбинации включения ключей на парных модулях устройства, от 1 до 4 096;

P_n^{I-XII} - активная мощность, передаваемая одним модулем в зависимости от положения ключей на модуле;

n - положение ключей на парных модулях (1 или 2);

$$Q_m = Q_n^I + Q_n^{II} + Q_n^{III} + Q_n^{IV} + Q_n^V + Q_n^{VI} + Q_n^{VII} + Q_n^{VIII} + Q_n^{IX} + Q_n^X + Q_n^{XI} + Q_n^{XII} \quad (7)$$

где Q_n^{I-XI} - реактивная мощность, передаваемая одним модулем в зависимости от положения ключей на модуле;

n - положение ключей на парных модулях (1 или 2).

Так как расчеты передаваемой величины мощности устройством велись относительно модулей установленных между трансформаторами устройства, формулы 6 и 7 необходимо дополнить потерями активной и реактивной составляющих мощностей в трансформаторах передающей (S) и принимающей (R) системами: $\Delta P_s, \Delta Q_s, \Delta P_r, \Delta Q_r$.

Таблица 2
Аргумент активной составляющей, в зависимости от положения ключей.

Модуль	Положение ключей на модуле, n	
	1	2
элементы первого рода		
<i>I</i>	$(\delta_{sr} - 12\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 6\psi + \alpha)$
<i>II</i>	$(\delta_{sr} - 12\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 6\psi + \alpha)$
<i>V</i>	$(\delta_{sr} - 2\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 8\psi + \alpha)$
<i>VI</i>	$(\delta_{sr} - 2\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 8\psi + \alpha)$
<i>IX</i>	$(\delta_{sr} - 4\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 10\psi + \alpha)$
<i>X</i>	$(\delta_{sr} - 4\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 10\psi + \alpha)$
элементы второго рода		
<i>III</i>	$(\delta_{sr} - 7\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - \psi + \alpha)$
<i>IV</i>	$(\delta_{sr} - 7\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - \psi + \alpha)$
<i>VII</i>	$(\delta_{sr} - 9\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 3\psi + \alpha)$
<i>VIII</i>	$(\delta_{sr} - 9\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 3\psi + \alpha)$
<i>XI</i>	$(\delta_{sr} - 11\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 5\psi + \alpha)$
<i>XII</i>	$(\delta_{sr} - 11\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 5\psi + \alpha)$

Таблица 3
Аргумент реактивной составляющей, в зависимости от положения ключей.

Модуль	Положение ключей на модуле, n	
	1	2
элементы первого рода		
<i>I</i>	$(\delta_{sr} - 9\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 3\psi + \alpha)$
<i>II</i>	$(\delta_{sr} - 9\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 3\psi + \alpha)$
<i>V</i>	$(\delta_{sr} - 11\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 5\psi + \alpha)$
<i>VI</i>	$(\delta_{sr} - 11\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 5\psi + \alpha)$
<i>IX</i>	$(\delta_{sr} - \psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 7\psi + \alpha)$
<i>X</i>	$(\delta_{sr} - \psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 7\psi + \alpha)$
элементы второго рода		
<i>III</i>	$(\delta_{sr} - 4\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 10\psi + \alpha)$
<i>IV</i>	$(\delta_{sr} - 4\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 10\psi + \alpha)$
<i>VII</i>	$(\delta_{sr} - 6\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 12\psi + \alpha)$
<i>VIII</i>	$(\delta_{sr} - 6\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 12\psi + \alpha)$
<i>XI</i>	$(\delta_{sr} - 8\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 2\psi + \alpha)$
<i>XII</i>	$(\delta_{sr} - 8\psi + \alpha)$	$(\delta_{sr} - 2\psi + \alpha)$

Выполненные расчеты для всех 4096 комбинаций включения ключей подтверждают полученные результаты при моделировании посредством перебора различных комбинаций включения ключей на устройстве [20], при этом погрешность между расчетными данными и данными полученными при моделировании колеблется в пределах от 0,5% до 1,5%.

Анализ полученных данных позволил выявить цикл из 71 уникального варианта стабильной передачи активной и реактивной мощности по заданной диаграмме переключений ключей при согласовании частоты.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Режим максимальной передачи активной мощности устройством, при регулировании угла δ_{sr} в пределах диапазона $0^\circ \div 360^\circ$, содержит 12 четко повторяющихся участка соответствующих характеристик, появление которых обусловлено действием коммутационных операций с тиристорными ключами в соответствии с заданной диаграммой переключений, рис. 3.

Согласно приведенной диаграмме переключений рис. 3 и условию, что $\delta_{sr} = 0^\circ$, необходимо включить следующую комбинацию ключей на устройстве:

$$I, II - 1 \quad III, IV - 2 \quad V, VI - 1 \\ VII, VIII - 2 \quad IX, X - 2 \quad XI, XII - 1$$

Тогда выражение 6 и 7 примут следующий вид:

Активная мощность:

$$P_m = 2 \cdot P \cdot \cos(\delta_{sr} - 12\psi + \alpha) + \\ + 2 \cdot P \cdot \cos(\delta_{sr} - \psi + \alpha) + \\ + 2 \cdot P \cdot \cos(\delta_{sr} - 2\psi + \alpha) + \\ + 2 \cdot P \cdot \cos(\delta_{sr} - 3\psi + \alpha) + \\ + 2 \cdot P \cdot \cos(\delta_{sr} - 10\psi + \alpha) + \\ + 2 \cdot P \cdot \cos(\delta_{sr} - 11\psi + \alpha),$$

Подставив в полученное выражение $P = 332 \text{ W}$ и $\delta_{sr} = 0^\circ$ получим следующий результат:

$$P_m = 2466,12 \text{ W}$$

Реактивная мощность:

$$Q_m = 30 + 2 \cdot Q \cdot \cos(\delta_{sr} - 9\psi + \alpha) + \\ + 2 \cdot Q \cdot \cos(\delta_{sr} - 10\psi + \alpha) + \\ + 2 \cdot Q \cdot \cos(\delta_{sr} - 11\psi + \alpha) + \\ + 2 \cdot Q \cdot \cos(\delta_{sr} - 12\psi + \alpha) + \\ + 2 \cdot Q \cdot \cos(\delta_{sr} - 7\psi + \alpha) + \\ + 2 \cdot Q \cdot \cos(\delta_{sr} - 8\psi + \alpha),$$

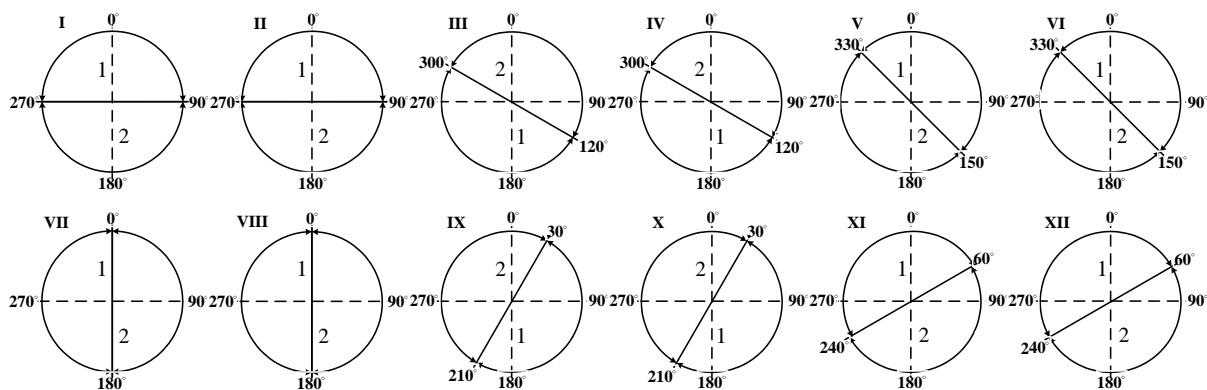


Рис.3. Диаграмма переключений многомодульного преобразователя.

Подставив в полученное выражение $Q = 332 \text{ Var}$ и $\delta_{sr} = 0^\circ$ получим следующий результат:

$$Q_m = 737 \text{ Var}$$

А с учетом потери мощности в трансформаторах:

$$\Delta P_s = 80 \text{ W}, \Delta Q_s = 92,5 \text{ Var}$$

$$\Delta P_r = 81 \text{ W}, \Delta Q_r = 80 \text{ Var}$$

Расчетные мгновенные значения активных и реактивных мощностей на входе и выходе устройства будут равны:

$$P_s = P_m + \Delta P_s = 2466 + 80 = 2546 \text{ W},$$

$$Q_s = -Q_m + \Delta Q_s = -737 + 92,5 = -645 \text{ Var}$$

$$P_r = P_m - \Delta P_r = 2466 - 81 = 2385 \text{ W},$$

$$Q_r = Q_m - \Delta Q_r = 737 - 80 = 657 \text{ Var}$$

Выполнив аналогичные расчеты для всех остальных 11 участков с шагом $7,5^\circ$ и условия, что изменение комбинации включенных ключей на устройстве происходит через каждые 30° при движении по часовой стрелке были построены кривые передачи активной (P) и реактивной (Q) составляющих на каждом модуле. На рис. 4 представлены кривые передачи активной и реактивной составляющих на первых двух парах сопряженных реактивных элементов

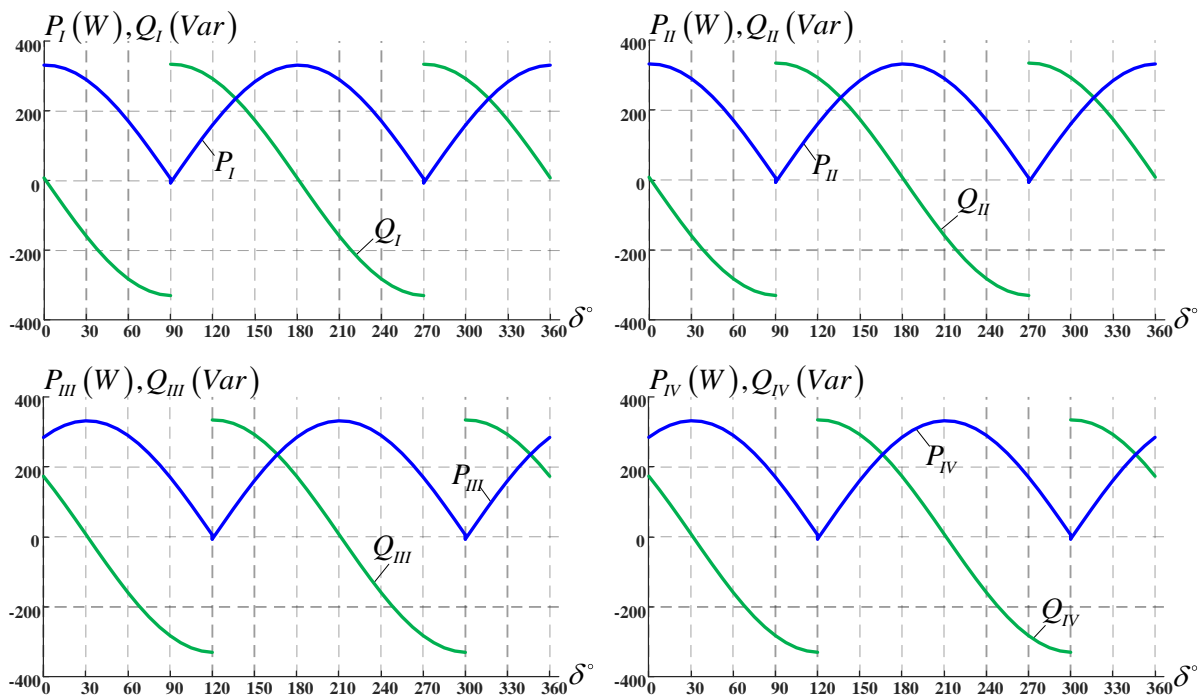


Рис.4. Кривые передачи активной и реактивной составляющих на каждом модуле.

иллюстрирующих 30° смещение на каждой последующей паре элементов.

Передаваемая активная и реактивная мощность 12 модулями устройства графически будет иметь следующий вид, рис.5.

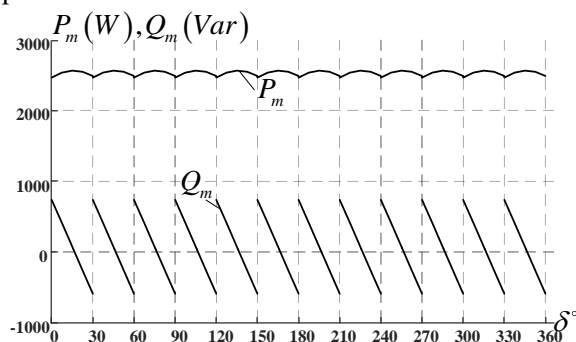


Рис.5. Сумма расчетных значений активных и реактивных мощностей модулей.

На рис. 6 графически представлены значения активных и реактивных мощностей на входе и выходе устройства в условиях статического режима, с учетом потерь мощности в трансформаторах согласно диаграммы переключения ключей рис. 3 на модулях преобразователя.

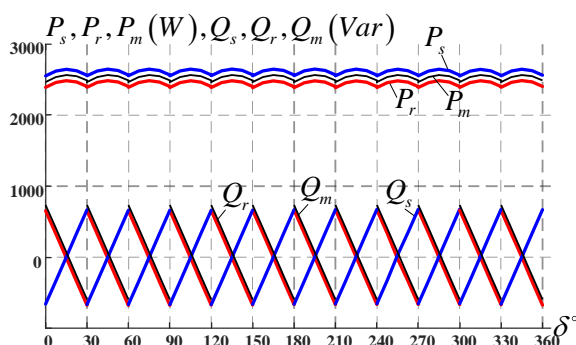


Рис.6. Расчетные значения активных и реактивных мощностей на входе и выходе устройства в условиях статического режима.

Для определения времени работы каждой комбинации ключей в динамическом режиме, необходимо знать величину скольжения по частоте между системами.

Заключение

По результатам исследования можно сделать выводы, что разработанный способ определения режимных характеристик преобразователя частоты:

1. позволяет получить полную картину, иллюстрирующую как установившийся режим работы устройства в целом, так и характеристики отдельных его элементов;

2. обладает достаточной точностью, об этом свидетельствует анализ характеристик, полученных с помощью имитационной модели и рассчитанных на основе предлагаемой методики.

3. позволяет определить, при соответствующей комбинации включения ключей на устройстве, уровень передаваемой активной и реактивной мощностей устройством в статических режимах;

4. позволяет расчетным путем выявить уникальные варианты стабильной передачи мощности и определить диаграммы переключений ключей для каждого варианта при согласовании частоты;

5. может быть применен для определения и анализа характеристик устройств такого типа при изучении их установившийся режимов работы, а также определения характеристик отдельных элементов.

Литература (References)

- [1] Elamari Khalid; Lopes Luiz A. C." Comparison of Static Phase Shifter and Unified Power Flow Controller-Based Interphase" *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 40, Issue – 2, August 2017, pp. 139–148.
- [2] Elamari K.; Lopes L. A. C." Comparison of phase shifting transformer and unified power flow control based interphase power controllers" *2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, December 2016, pp. 1–6.
- [3] Pourhossein J.; Gharehpetian G. B.; Fathi S. H." Unified Interphase Power Controller (UIPC) Modeling and Its Comparison with IPC and UPFC" *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, Issue – 4, August 2012, pp. 1956–1963.
- [4] Farmad M.; Farhangi S.; Afsharnia S.; Gharehpetian G. B." Modelling and simulation of voltage source converter-based interphase power controller as fault-current limiter and power flow controller" *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 5, Issue – 11, November 2011, pp. 1132–1140.
- [5] Firouzi Mehdi; Gharehpetian Gevork B.; Salami Younes" Active and reactive power control of wind farm for enhancement transient stability of multi-machine power system using UIPC" *IET Renewable Power Generation*, Vol. 11, Issue – 8, July 2017, pp. 1246–1252.
- [6] Samadi Afshin; Farhangi Shahrokh" Analysis, control and modeling of cascaded multilevel converter-based IPC" *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, January 2009, pp. 3213–3218.
- [7] Yi Shan-jun; Yu Ji-lai; Guo Zhi-zhong" Performances coordination strategies of dynamic

- controlled inter-phase power controller (DCIPC)” *2004 International Conference on Power System Technology, 2004. Power Con 2004.*, Vol. 1, July 2005, pp. 367–372.
- [8] Juan Li; Naixin Yan; Ying Yue; Hanxu You” Designing of PI controller of thyristor controlled interphase power controller for improving transient stability of power system” *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering*, October 2011, pp. 2154–2157.
- [9] Brochu J., Pelletier P., Beaugard F., Morin G.,”The Interphase Power Controller-A New Concept for Managing Power Flow Within AC Networks”, *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 9, No. 2, April 1994.
- [10] Beaugard F., Brochu J., Morin G., Pelletier P.,” Interphase Power Controller with Voltage Injection”, *IEEE Transactions PWRD*, Vol. 9, No. 4, October 1994, pp. 833-841.
- [11] Pierre Couture, Senior Member, IEEE, Jacques Brochu, Senior Member, IEEE, Gilbert Sybille, Pierre Giroux, Alpha Oumar Barry,” Power Flow and Stability Control Using an Integrated HV Bundle-Controlled Line-Impedance Modulator”, *IEEE Transactions PWRD*, Vol. 25, No. 4, October 2010, pp 2940-2949.
- [12] Funaki T., Matsuura K.,” Feasibility of the low frequency AC transmission.” *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Singapore, Jan. 2000. pp. 2693-2698.
- [13] Mohammed Amarullah S., Hameed Shaik,” Improving power line utilization and performance with FACTS devices in disturbed power systems”, *International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication*, vol-1, Issue-10, Dec-2013 pp. 17-20.
- [14] Satyanarayana V.V. Rao. R., S. Rama Reddy,” Digital Simulation of Thyristor Controlled Interphase Power Control Technology (TCIPC) to limit the fault currents”, *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, Vol 5 No 3 Jun-Jul 2013.
- [15] Mohammadi M.; Gharehpetian G. B.” Thyristor controlled interphase power controller modeling for power system dynamic studied” *TENCON 2004. 2004 IEEE Region 10 Conference*, Vol. 3, May 2005, pp. 355–358
- [16] Pourhossein J., Gharehpetian G.B., Fathib S.H., ”Static Inter-Phase Power Controller (SIPC) modeling for load flow and short circuit studies”, *Energy Conversion and Management* Vol 64, Dec 2012, pp. 145–151.
- [17] Jean Jacques Mandeng, Charles Hubert Kom, Jean Mbihi,” Modeling and Simulation of an Electric Power Transmission Line Under Asymmetric Compensation by Dual Inter-Phase Power Controllers”, *International Journal on Energy Conversion (IRECON)*, Vol 3, No 4, 2015, pp. 111- 119.
- [18] Calinin L., Zaițev D., Tîrșu M.,” Application of the Phase Shift Transformer as Frequency Converter”, *International Conference on Modern Power Systems MPS2011*, May, 2011, Cluj-Napoca, Romania, p.99-102.
- [19] Tirshu M., Kalinin L., Zaitsev D., Golub I., Spivak V.,” The model and characteristics of circular phase convertor”, *SIELMEN 2015, 10th International Conference and Exhibition on Electromechanical and Power Systems* p.180-184.
- [20] Kalinin L.P., Zaitsev D.A., Tirsu M.S., Kaloshin D.N.,” The new variant of adaptive Interphase Power Controller with a wide range of controllability”, *Modern Power Systems (MPS), 2017, IEEE International Conference*, Cluj-Napoca, Romania, 6-9 June p.1-5.
- [21] Junjie Zhu; Qinsong Qian; Shengli Lu; Weifeng Sun; Haojie Tian,”A Phase-shift Triple Full-bridge Converter with Three Shared Leading-legs”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol PP, November 2017, pp. 1- 1.
- [22] Feng Gao; K. Strunz,” Modeling of constant distributed parameter transmission line for simulation of natural and envelope waveforms in power electric networks”, *Power Symposium, 2005. Proceedings of the 37th Annual North American*, December 2005, pp. 247–252.
- [23] Farmad M.; Farhangi S.; Afsharnia S.; Gharehpetian G. B.” Application of voltage source converter in Interphase Power Controller for power flow control and fault limitation” *2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, January 2009, pp. 2301–2306

Сведения об авторе.



Калошин Данила Николаевич

Институт Энергетики, научный сотрудник. Научные интересы связаны с исследованием современных средств управления режимами энергосистем, содержащих гибкие межсистемные связи.

E-mail: danila-nik2005@yandex.ru