

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОСТЕЙШИХ СХЕМ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПО УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Проведено порівняльний аналіз двохелементних схем індуктивно-ємнісних перетворювачів (ІЕП) з урахуванням характеру навантаження. Видані рекомендації щодо застосування тієї чи іншої схеми залежно від ємнісної чи індуктивної реакції навантаження.

Одним из наиболее важных показателей индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП) является установленная мощность их реактивных элементов, так как именно она определяет массу, габариты и стоимость преобразователя. Большинство публикаций по этой тематике посвящено оптимизации ИЕП и разработке новых более совершенных именно по этому параметру схем преобразователей. Проводившиеся ранее исследования в основном велись в предположении, что нагрузка носит чисто активный характер. Однако зачастую ИЕП используют совместно с согласующим трансформатором, который, как правило, подключается к выходным цепям преобразователя. Индуктивность рассеивания трансформатора при расчете и оптимизации схем ИЕП при этом не учитывалась. Еще более характерный случай использования ИЕП для питания двигателей переменного тока, которые имеют значительную индуктивную реакцию. Если же при расчете, анализе и проектировании характер нагрузки не учитывается, то должны быть веские доказательства того, что это обстоятельство мало влияет на величину токов в элементах схем.

Ранее авторами был выполнен анализ работы на комплексную нагрузку простейших схем ИЕП Г-образной структуры [2]. Воспользуемся полученными результатами и определим схемы с наименьшей установленной мощностью элементов в зависимости от характера нагрузки.

В настоящей работе сохранены все допущения и обозначения, принятые в работе [2]. Абсолютное значение реактивной мощности элемента найдем как произведение квадрата модуля тока, протекающего через элемент, на его реактивное сопротивление. Для схем, рассмотренных в [2], эти выражения будут иметь следующий вид:

$$Q_L = I_L^2 x_L; \quad Q_C = I_C^2 x_C; \quad S_H = I_H^2 z_H,$$

где Q_L , Q_C , S_H – абсолютные значения реактивных мощностей соответственно дросселя, конденсатора и полной мощности нагрузки; I_L , I_C , I_H – модули токов, протекающих через дроссель, конденсатор, нагрузку; x_L , x_C , z_H – реактивное сопротивление дросселя, конденсатора и полное сопротивление нагрузки.

Подставив в эти соотношения выражения (6)...(8), полученные в работе [2], для определения соответствующих токов имеем

$$Q_L = \frac{n^2 E_I^2 + 2nE_I^2 \sin\varphi_H + 2nE_I E_{II} \sin(\varphi_2 - \varphi_I - \varphi_H) + E_I^2 + E_{II}^2 + 2E_I E_{II} \cos(\varphi_2 - \varphi_I)}{x}; \quad (1)$$

$$Q_C = \frac{n^2 E_I^2 + 2nE_I E_{II} \sin(\varphi_2 - \varphi_I - \varphi_H) + E_{II}^2}{x}; \quad (2)$$

$$S_H = \frac{E_I^2 n}{x}. \quad (3)$$

Однако мощность элементов, вычисленная по полученным выражениям, не дает однозначного ответа на вопрос какая из исследуемых схем лучше, потому что остается неизвестной мощность, выделяющаяся в нагрузку. Обычно для сравнения схем используют понятие относительной мощности q , которая представляет собой отношение текущего значения реактивной мощности элемента к мощности нагрузки:

$$q_L = \frac{Q_L}{S_H} = n + 2 \sin \varphi_H + 2 \frac{E_{II}}{E_I} \sin(\varphi_2 - \varphi_1 - \varphi_H) + \frac{1}{n} + \frac{1}{n} \frac{E_{II}^2}{E_I^2} + 2 \frac{E_{II}}{E_I n} \cos(\varphi_2 - \varphi_1); \quad (4)$$

q_L – относительная мощность дросселя.

$$q_C = n + 2 \frac{E_{II}}{E_I} \sin(\varphi_2 - \varphi_1 - \varphi_H) + \frac{E_{II}^2}{E_I^2 n}, \quad (5)$$

q_C – относительная мощность конденсатора.

Полученные выражения дают возможность вычислить относительную мощность реактивных элементов при любом сопротивлении нагрузки. Очевидно, наиболее эффективно используются элементы ИЕП, если удельная мощность имеет минимальное значение. То значение сопротивления нагрузки, при котором достигается этот минимум, называют оптимальным ($n_{ОПТ}$). Чтобы найти оптимальные значения, приравняем первые производные выражений (4) и (5) к нулю.

Для определения оптимального значения сопротивления нагрузки при оптимизации реактивной мощности дросселя ($n_{ОПТ}^L$) имеем

$$\frac{dq_L}{dn} = 1 - \frac{1}{n^2} - \frac{1}{n^2} \frac{E_{II}^2}{E_I^2} - \frac{2}{n^2} \frac{E_{II}}{E_I} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 0;$$

$$n_{ОПТ}^L = \sqrt{1 + \frac{E_{II}^2}{E_I^2} - \frac{2}{n^2} \frac{E_{II}}{E_I} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}. \quad (6)$$

Соответственно для определения оптимального значения сопротивления нагрузки при оптимизации конденсаторной батареи получим следующие соотношения:

$$\frac{dq_C}{dn} = 1 - \frac{E_{II}^2}{E_I^2 n^2} = 0; \quad n_{ОПТ}^C = \frac{E_{II}}{E_I}. \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) следует, что оптимальные значения сопротивления не зависят от характера нагрузки и определяются параметрами контурных ЭДС в зависимости от варианта выполнения. Таких вариантов для схем ИЕП Г-образной структуры семь. Значения контурных ЭДС для каждого из этих вариантов можно взять из приведенной в работе [2] таблицы. Для активной нагрузки оптимальные значения сопротивлений определены в работе [1] (табл. 5). Воспользуемся полученными там данными. Эти значения представлены в табл. 1 (3-я колонка).

Таблица 1

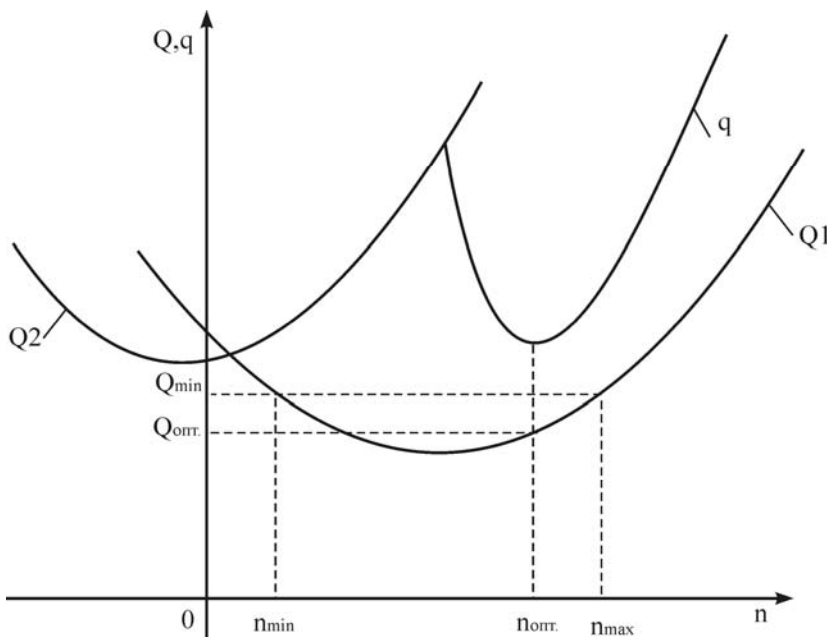
№ варианта	Вид сопротивления	Оптимальное значение $n_{ОПТ}$	Аргумент комплексного сопротивления нагрузки, φ						
			90°	60°	30°	0°	-30°	-60°	-90°
1	n_{Lmax}	1,0	-2,0	-1,73	-1,0	0	1,0	1,73	2,0
	n_{Cmax}	0	0	0	0	0	0	0	0
2	n_{Lmax}	1,0	-3,0	-1,73	0	1,73	3,0	3,46	3,0
	n_{Cmax}	1,0	-1,0	0	1,0	1,73	2,0	1,73	1,0
3	n_{Lmax}	1,0	-3,0	-3,46	-3,0	-1,73	0	1,73	3,0

	n_{Cmax}	1,0	-1,0	-1,73	-2,0	-1,73	-1,0	0	1,0
4	n_{Lmax}	$1/\sqrt{3}$	-3,0	-2,31	-1,0	0,58	2,0	2,89	3,0
	n_{Cmax}	$1/\sqrt{3}$	-1,0	-0,58	0	0,58	1,0	1,15	1,0
5	n_{Lmax}	$1/\sqrt{3}$	-3,0	-2,89	-2,0	-0,58	1,0	2,3	3,0
	n_{Cmax}	$1/\sqrt{3}$	-1,0	-1,15	-1,0	-0,58	0	0,58	1,0
6	n_{Lmax}	$\sqrt{3}$	-1,0	-1,73	-2,0	-1,73	-1,0	0	1,0
	n_{Cmax}	1,0	1,0	0	-1,0	-1,73	-2,0	-1,73	-1,0
7	n_{Lmax}	$\sqrt{3}$	-1,0	0	1,0	1,73	2,0	1,73	1,0
	n_{Cmax}	1,0	1,0	1,73	2,0	1,73	1,0	0	-1,0

Таким образом, оптимальное значение сопротивления нагрузки следует принимать в качестве расчетного в том случае, если нагрузка не меняется. Однако в большинстве случаев стабилизаторы тока на основе ИЕП используются для питания переменной нагрузки, которая изменяется от некоторого минимального до максимального значения. Если выбрать в качестве расчетного оптимальное значение сопротивления нагрузки, равное максимально возможному на заданном диапазоне, то необходимо убедиться в том, что на всем диапазоне изменения сопротивления нагрузки абсолютная мощность рассматриваемого реактивного элемента не превысит мощности, определенной при оптимальном сопротивлении.

Из (1) и (2) следует, что выражения, описывающие абсолютные мощности, являются квадратичными функциями, графиками которых являются параболы. Вершины этих парабол соответствуют минимуму функции и в зависимости от варианта подключения ЭДС питания могут находиться в первом либо во втором координатном углу, т.е. при положительном или отрицательном значении относительного сопротивления нагрузки. В реальных преобразователях относительное сопротивление нагрузки изменяется от нуля до некоторого максимального и не может быть меньше нуля. Соответственно и графики изменения абсолютного значения реактивной мощности могут иметь минимум при некотором положительном значении сопротивления (кривая Q1 на рисунке) или не иметь его (кривая Q2 на рисунке). Ясно, что в том случае, когда кривая изменения абсолютного значения реактивной мощности не имеет минимума при положительных значениях сопротивления нагрузки, мощность с ростом нагрузки будет возрастать. При этом максимальному значению сопротивления будет соответствовать максимальное значение реактивной мощности. Здесь установленная мощность реактивного элемента может быть определена при максимальном значении сопротивления нагрузки, которое в свою очередь принимается равным оптимальному значению.

Если же кривая изменения абсолютного значения реактивной мощности рассматриваемого элемента имеет минимум при некотором положительном значении относительного сопротивления нагрузки, тогда возможно такое расположение графиков изменения абсолютного и относительного значений, при котором условие выбора оптимального значения сопротивления нагрузки в качестве максимально возможного не гарантирует, что мощность реактивного элемента при этом будет иметь также максимальное значение. Например, рассмотрим представленные на рисунке графики изменения абсолютной Q1 и относительной q мощностей. Если мы выбрали в качестве расчетного оптимальное значение сопротивления нагрузки, то при уменьшении нагрузки абсолютное значение реактивной мощности может превышать значение при оптимальном сопротивлении ($Q_{min.} > Q_{opt.}$).



Из рисунка следует, что здесь целесообразно за расчетное принимать то сопротивление нагрузки, при котором абсолютное значение реактивной мощности будет равно значению при n_{min} . Если сопротивление нагрузки меняется в полном диапазоне, то целесообразно за расчетное принимать сопротивление, при котором абсолютная мощность реактивного элемента будет равна мощности при $n=0$, т.е. при коротком замыкании. Обозначим это сопротивление через n_{max} .

Рассмотренные варианты расположения графи-

ков абсолютной и относительной мощностей позволяют сформулировать правило определения расчетного значения сопротивления нагрузки, а именно: если нагрузка изменяется в некотором диапазоне, то необходимо определить оптимальное значение сопротивления нагрузки и максимальное значение, т.е. то значение, при котором абсолютная мощность реактивного элемента будет равна мощности при минимальном (на данном диапазоне) сопротивлении нагрузки и большее из полученных значений принимать в качестве расчетного.

Для полного диапазона изменения сопротивления нагрузки максимальные значения сопротивлений найдем из выражений (1) и (2), определив и приравняв мощности при $n=0$ и при n_{max} :

$$n_{max}^L = -2 \cdot \left[\sin \varphi_H + \frac{E_{II}}{E_I} \sin(\varphi_2 - \varphi_1 - \varphi_H) \right]; \quad (8)$$

$$n_{max}^C = -2 \cdot \frac{E_{II}}{E_I} \sin(\varphi_2 - \varphi_1 - \varphi_H). \quad (9)$$

Из выражений (8) и (9) следует, что максимальные значения сопротивления нагрузки зависят от варианта подключения ЭДС питающей сети и характера нагрузки.

Вычисленные по выражениям (8) и (9) максимальные значения сопротивления при изменении нагрузки от чисто индуктивной до емкостной шагом в 30 эл. град. приведены в табл. 1. Сравнивая полученные величины со значением оптимального сопротивления, большее из них принимаем в качестве расчетного. В табл. 2 представлены значения расчетных сопротивлений n_{LP} и n_{CP} , найденные согласно сформулированному здесь правилу.

Таблица 2

№ варианта	Вид расчетного сопротивления	Аргумент комплексного сопротивления нагрузки, φ						
		90^0	60^0	30^0	0^0	-30^0	-60^0	-90^0
1	n_{LP}	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	$\sqrt{3}$	2,0
	n_{CP}	0	0	0	0	0	0	0
2	n_{LP}	1,0	1,0	1,0	$\sqrt{3}$	3,0	$2\sqrt{3}$	3,0
	n_{CP}	1,0	1,0	1,0	$\sqrt{3}$	2,0	$\sqrt{3}$	1,0
3	n_{LP}	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	$\sqrt{3}$	3,0

	n_{CP}	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
4	n_{LP}	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	2,0	$5/\sqrt{3}$	3,0
	n_{CP}	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	1,0	$2/\sqrt{3}$	1,0
5	n_{LP}	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	1,0	$4/\sqrt{3}$	3,0
	n_{CP}	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	1,0
6	n_{LP}	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$
	n_{CP}	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
7	n_{LP}	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	2,0	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$
	n_{CP}	1,0	$\sqrt{3}$	2,0	$\sqrt{3}$	1,0	1,0	1,0

Подставив расчетное сопротивление нагрузки в (4) и (5), найдем установленную относительную мощность дросселя и конденсатора в зависимости от изменения аргумента нагрузки. Полученные данные для рассматриваемых схем представлены в табл. 3.

Таблица 3

№ варианта	Вид мощности	Аргумент комплексного сопротивления нагрузки, φ						
		90^0	60^0	30^0	0^0	-30^0	-60^0	-90^0
1	\bar{Q}_L	4,0	3,73	3,0	2,0	1,0	0,58	0,5
	\bar{Q}_C	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,73	2,0
2	\bar{Q}_L	5,0	3,73	2,0	0,58	0,33	0,29	0,33
	\bar{Q}_C	3,0	2,0	1,0	0,58	0,5	0,58	1,0
3	\bar{Q}_L	5,0	5,46	5,0	3,73	2,0	0,58	0,33
	\bar{Q}_C	3,0	3,73	4,0	3,73	3,0	2,0	1,0
4	\bar{Q}_L	4,15	3,46	2,15	0,58	0,17	0,12	0,11
	\bar{Q}_C	2,15	1,73	1,15	0,58	0,33	0,29	0,33
5	\bar{Q}_L	4,15	4,04	3,15	1,73	0,33	0,14	0,11
	\bar{Q}_C	2,15	2,3	2,15	1,73	1,15	0,58	0,33
6	\bar{Q}_L	4,46	5,19	5,46	5,19	4,46	3,46	2,46
	\bar{Q}_C	1,0	2,0	3,0	3,73	4,0	3,73	3,0
7	\bar{Q}_L	4,46	3,46	2,46	1,73	1,5	1,73	2,46
	\bar{Q}_C	1,0	0,58	0,5	0,58	1,0	2,0	3,0

Из таблицы следует, что в случае активного характера нагрузки, полученные данные полностью совпадают с результатами, представленными в [1].

При однофазном исполнении ИЕП наиболее часто используется схема Бушера (первый вариант). Согласно полученным результатам реактивная мощность элемента, включенного параллельно нагрузке (в данном случае емкости), не изменяется в широком диапазоне изменения характера нагрузки (от чисто индуктивной до слабо емкостной) и равна мощности нагрузки. В то же время установленная мощность элемента, включенного последовательно с нагрузкой, увеличивается с ростом индуктивной реакции нагрузки и уменьшается с ростом емкостной. Выявленное свойство целесообразно использовать при проектировании конкретных устройств на основе ИЕП. Например, если технологический процесс включает в себя непродолжительный режим холостого хода, а характер нагрузки располагается в индуктив-

но-активном диапазоне, то целесообразно использовать схему типа LC (емкость включена параллельно нагрузке). В этом случае в режиме холостого хода и наличии согласующего трансформатора характер нагрузки изменится до почти индуктивного, в связи с чем возрастает ток, протекающий через дроссель, а режим работы конденсаторной батареи практически не изменится. Учитывая кратковременность рассматриваемого режима работы, перегрузка дросселя не влечет за собой существенных отрицательных последствий, в то время как даже кратковременная перегрузка конденсатора, как правило, приводит к пробое изоляции и выходу его из строя.

В трехфазной сети наиболее часто используются ИЕП, собранные по схеме «Звезда» (2-й вариант) или Штейнметца (4-й вариант). Они равноценны по установленной мощности реактивных элементов при активном характере нагрузки. В них мощность конденсаторной батареи и мощность дросселя равны и составляют 0,58 от мощности нагрузки. В то же время результаты анализа показывают, что при индуктивном характере нагрузки предпочтительнее использовать схему «Звезда», а при емкостном – схему Штейнметца.

При оптимизации установленной мощности конденсаторных батарей и индуктивном характере нагрузки наилучшими характеристиками обладает схема ИЕП, выполненная по 7-му варианту. Здесь мощность конденсаторной батареи составляет от 0,5 до 1,0 мощности нагрузки.

Наиболее часто применяемые схемы «Звезда» и Штейнметца являются одними из самых критичных по отношению к индуктивной нагрузке. Даже небольшая величина индуктивности, как следует из табл. 3, приводит к существенному повышению установленных мощностей конденсаторов и дросселей ИЕП. В то же время при емкостном характере нагрузки установленная мощность элементов ИЕП, выполненных по этим схемам, снижается. Это свойство можно использовать для снижения установленных мощностей элементов ИЕП путем введения в цепь нагрузки дополнительных конденсаторных батарей, изменяя тем самым активно-индуктивный характер нагрузки на активно-емкостный. Экономическая целесообразность такого регулирования должна подтверждаться в каждом конкретном случае дополнительными исследованиями.

Проведен сравнительный анализ двухэлементных схем индуктивно-емкостных преобразователей с учетом характера нагрузки. Выданы рекомендации относительно применения той или другой схемы в зависимости от емкостной или индуктивной реакции нагрузки.

The comparative analysis of two-element schemes of inductance-capacitance converters with regard for the loading type was carried out. Recommendations about application of this or that scheme depending on capacitor or inductive reaction of loading are made.

1. Волков И.В., Губаревич В.Н., Исаков В.Н., Кабан В.П. Принципы построения и оптимизация схем индуктивно-емкостных преобразователей. – К.: Наук. думка. 1981. – 173 с.
2. Кабан В.П., Матвеев В.Ю., Губаревич В.Н., Спиринов В.М. Расчет основных параметров индуктивно-емкостных преобразователей с учетом характера нагрузки // Пр. Ин-ту электродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2008. – № 21. – С. 118–121.

Надійшла 2.04.2009