

УДК 519.8 621.31

DOI: 10.30987/conferencearticle_5c19e61d557532.76134464

Е. С. Кинев
(г. Красноярск, ООО «Тепловые электрические системы»)
А. А. Тяпин
(г. Красноярск, Сибирский федеральный университет)

СХЕМОТЕХНИКА ПОДКЛЮЧЕНИЯ IGBT-ИНВЕРТОРА К МНОГОФАЗНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ МАШИНЕ

Рассмотрены особенности подключения инверторов к линейным индукционным машинам, предназначенным для перемешивания алюминиевых сплавов. Режимы частотного преобразователя с несимметричным индуктором выходят далеко за рамки, типовых и близки к аварийным. Поэтому при разработке трёхфазных IGBT-инверторов учитывают схемотехнику обмоток индукционных машин и низкий коэффициент мощности. Проектирование инвертора выполняют по результатам моделирования магнитного поля и режимов силовых цепей. Распределение токов и магнитодвижущих сил в обмотках исследуют с применением векторных диаграмм. По результатам расчета выбирают комплектующие, а в алгоритме ШИМ-контроллера предусматривают мутацию режима и ограничивают диапазон срабатывания защиты.

The paper discusses the features of connecting inverters to linear induction machines for stirring aluminum alloys. Modes of the inverter with an asymmetrical inductor go far beyond the typical, and close to emergency. Therefore, when developing three-phase IGBT-inverters, circuitry of induction machine windings and a low power factor are taken into account. The design of the inverter is performed according to the results of modeling a magnetic field and power circuit modes. The distribution of currents and magnetomotive forces in the windings is investigated using vector diagrams. According to the calculation results, components are selected, and in the PWM controller algorithm, the mode mutation is provided for and the range of protection is limited.

Ключевые слова: трёхфазный частотный инвертор, индуктор продольного магнитного поля, схемотехника индукционной машины, моделирование силовых цепей, векторная диаграмма токов, нелинейная магнитная схема замещения, МДС многофазной обмотки индуктора.

Keywords: three-phase frequency inverter, longitudinal magnetic field inductor, induction machine circuitry, power circuit simulation, vector current diagram, nonlinear magnetic equivalent circuit, magnetomotive force of the inductor multiphase winding.

Постановка задачи. Транзисторные инверторы с регулируемой частотой тока получили широкое распространение в качестве источников питания индукционного металлургического оборудования [1]. Это обусловлено их неоспоримыми достоинствами, надёжностью, экономичностью, невысокой стоимостью и несложной схмотехникой. Структура трёхфазного частотного преобразователя уже стала классической и содержит управляемый входной выпрямитель с модулем сброса мощности, звено постоянного тока с накопителем энергии и силовое выходное звено – IGBT-инвертор. Вместе с электромагнитным индуктором источник питания образует комплекс оборудования, который может быть использован по различному назначению, от перемешивания жидкого металла до экструзии алюминия. Исполнительные органы подобных комплексов – индукционные устройства (индукторы) с обмотками могут быть весьма разнообразными, например, учитывая их применение в качестве линейных машин [2]. Конфигурация индуктора зависит от его назначения и габаритной мощности, причём схмотехника подключения обмоток индукционных машин (ИМ) довольно многообразна [3]. Помимо традиционных схем звезды и треугольника, применяют неполнофазные, открытые, комбинированные и сдвоенные соединения. А ввиду инверсии подключения фаз или изменения направления навивки обмоток при использовании магнитопроводов число вариантов схем увеличивается. При этом в большинстве случаев многофазные схемы, в отличие от классического асинхронного двигателя, оказываются несимметричными [4]. Это приводит к несимметричным режимам частотных преобразователей. Такая особенность заставляет более внимательно относиться к разработке инверторов, изменению их аппаратного оснащения, коррекции алгоритмов управления и модификации защит [5].

Решение. Специфика конструкции укороченных трёхфазных индукционных машин с разомкнутым магнитопроводом [2] обуславливает несимметрию токов и магнитных потоков в индукторе комплекса электромагнитного перемешивания (ЭМП) расплава алюминия в печах. Для перемешивателей среднего габарита с эквивалентным коэффициентом мощности 0,05 – 0,1 на частоте около 1 Гц применяют частотные преобразователи, мощностью до 400 кВА при токах 250-300 А и напряжениях до 400 В.

Схема подключения силового звена электронного частотного инвертора [1], построенного на базе трех полумостов (D_1 , D_2 , D_3) к трёхфазному индуктору в звезде, показана на рис. 1. Силовой модуль обозначен – 1, звено постоянного тока с модулем утилизации мощности – 2, индукционная машина – 3. Для выравнивания симметрии напряжений использовано подключение нейтрали. Реализована схема $AxYbCz$.

Наиболее часто индукционные машины делают в трёхзонном исполнении. Это обусловлено спецификой размещения индуктирующих катушек многофазной обмотки на магнитопроводе [6]. В трёхзонной конструкции индукционная машина имеет три сосредоточенные обмотки, по 10 - 12 катушечных групп в каждой, локализованные между четырьмя зубцами. В представленной на рис.1 конфигурации предусмотрено включение трехфазных обмоток в треугольник с параметрами: число фаз $m = 3$, число пар полюсов $2p = 4/3$, число зубцов $Z = 4$, фазная зона $\alpha = 60$.

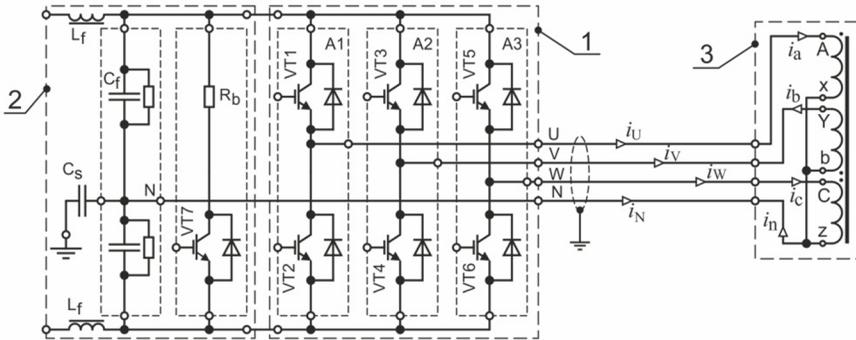


Рис. 1. Подключение инвертора к трёхзонной ИМ при соединении звездой

Учитывая разомкнутый характер магнитопровода [2], первоначально магнитными связями между фазами следует пренебречь. На предварительном этапе для схемы рис. 1 составляют топологические уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{I}_U &= \dot{I}_a, & \dot{I}_V &= -\dot{I}_b, & \dot{I}_W &= \dot{I}_c, \\ \dot{I}_a - \dot{I}_b + \dot{I}_c - \dot{I}_n &= 0 & \text{или} & & \dot{I}_n &= \dot{I}_a - \dot{I}_b + \dot{I}_c. \end{aligned} \quad (1)$$

Далее записанные соотношения используют для предварительной идентификации режима частотного инвертора путём построения и анализа векторной диаграммы. Более точно режим частотного преобразователя исследуют на этапе математического моделирования и оптимизации, а затем при проведении испытаний физической модели комплекса в целом [7].

Схема индуктора в треугольнике, при аналогичном $AxYbCz$ -варианте подключения к транзисторному инвертору, показана на рис.2. Для соединения обмоток треугольником также составляют систему уравнений по законам Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{I}_U + \dot{I}_c - \dot{I}_a &= 0, & \dot{I}_U &= \dot{I}_a - \dot{I}_c, \\ \dot{I}_V + \dot{I}_b + \dot{I}_a &= 0, & \dot{I}_V &= -\dot{I}_a - \dot{I}_b, \\ \dot{I}_W - \dot{I}_c - \dot{I}_b &= 0, & \dot{I}_W &= \dot{I}_c + \dot{I}_b. \end{aligned} \quad (2)$$

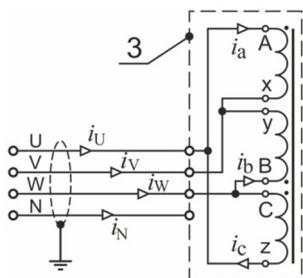


Рис. 2. Соединение ИМ треугольником

Записанные соотношения используют для идентификации режима инвертора и оценки переноса мощности между фазами. Дело в том, что в обмотках индукторов циркулируют большие реактивные мощности, поскольку режим индуктора близок к холостому ходу.

Отсутствие вращения в индукционных машинах создаёт определённые особенности управления электроникой, особенно при аварийной остановке. Такая ситуация возможна не только в случае внезапного прекращения электроснабжения, но также при возникновении аварий в системе

электропитания или в обмотках.

Общий вид индуктора продольного магнитного поля, предназначенного для перемешивания расплава алюминия в печах, и векторная диаграмма его МДС показаны на рисунке 3. Реализована аналогичная схема включения обмоток с несколько иным наименованием AxZcBy.

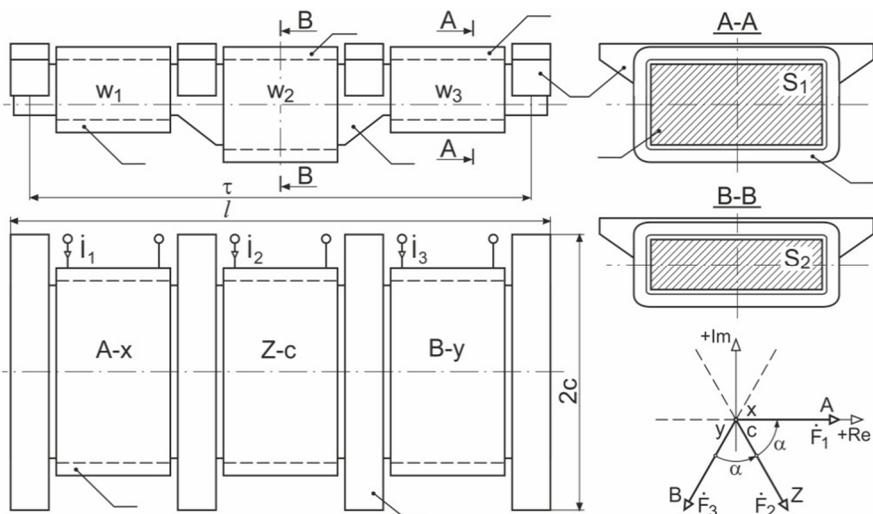


Рис. 3. Общий вид индукционной машины продольного магнитного поля

Учитывая нелинейные характеристики среды, а также сложную конфигурацию магнитной цепи, аналитический расчет распределения многофазных магнитных потоков в ярме и зубцах крайне затруднителен. Тем

не менее, задача достоверного определения размера фазных зон в пределах полюсного деления τ индукционной машины очень важна для оценки её эффективности при воздействии на расплав металла [8]. Поэтому для предварительного анализа применяют идеализированные векторные диаграммы, в которых заданному расположению векторов МДС (тока) соответствует идеальное распределение векторов магнитных потоков в областях магнитопровода, по оси обмоток. Следует заметить, что значительно больший интерес представляет решение задачи о достоверной оценке распределения магнитной индукции в зубцах. Именно зубцы индукционной машины ориентированы непосредственно в расплав металла и выполняют в индукторе роль концентраторов магнитного поля. Однако напрямую, по идеализированной картине МДС в обмотках, ориентацию векторов поля в зубцах определить не представляется возможным. Поэтому на первом этапе анализируют распределение токов, в треугольнике или в звезде по топологическим уравнениям, откуда получают сведения о режимах фаз инвертора, и о характере искажения симметрии токов. Уточнённую картину поля и распределение токов в обмотках получают путём вычислительного эксперимента с применением систем машинного моделирования наподобие Ansys Multyphysics [9] или Comsol Multyphysics.

По системам уравнений (1) и (2) для установившегося режима трёхфазной индукционной машины строят векторные диаграммы токов, потребляемых от инвертора. На рис. 4а показано распределение токов в инверторе, подключенном к звезде. На рис. 4б представлены токи в источнике, подключенном к треугольнику обмоток ИМ. В обоих случаях предполагается наличие одинаковых фазных токов I_a , I_b , I_c в обмотках, для которых при инвертировании средней фазы обеспечен фазовый сдвиг $\alpha = \pi/3$. Инверсия фазы – это традиционный прием, применяемый в индукторах для получения нужного характера распределения магнитных потоков.

Судя по диаграммам, в обоих схемах подключения индукционной машины режим работы инвертора несимметричен. Токи в линейных проводах могут не только отличаться по величине, но и уходить в обратную последовательность. При соединении звездой возникает ток в нейтральном проводе I_N удвоенной величины по отношению к любой фазе. Ток первой фазы инвертора (рис. 4а) имеет индуктивный (отстающий) характер при крайне малом значении коэффициента мощности, для фазового сдвига φ_U , близкого к углу $\pi/2$. Ток второй фазы инвертора имеет емкостной (опережающий) характер, для фазового сдвига φ_V , близкого к углу $(\pi/2 + \delta_V)$, свойственного уже для режима генерации. Ток третьей фазы инвертора

дублирует ток первой фазы при столь же большом значении фазового сдвига φ_W и малом индуктивном коэффициенте мощности.

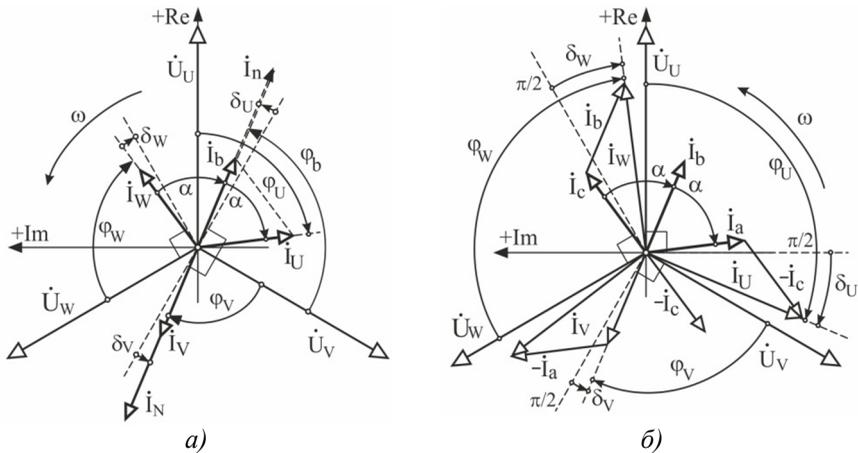


Рис. 4. Векторные диаграммы токов инвертора

При соединении обмоток индуктора треугольником возникает практически зеркальная картина (рис. 4б), при которой первая и вторая фазы уходят в режим рекуперации, а средняя фаза работает, сохраняя индуктивный характер потребления при крайне низком коэффициенте мощности. Так, в фазе U ток I_U отстаёт от напряжения на угол $(\pi/2 + \delta_U)$, несколько больший значения 90° , а сама фаза принимает генераторный характер с индуктивным коэффициентом мощности. Ток фазы V инвертора остаётся индуктивным для фазового сдвига φ_V , несколько меньшего значения, чем $\pi/2$, сохраняя свойства фазы как электроприемника. Ток фазы W отстаёт от напряжения на угол $\varphi_W = (\pi/2 + \delta_W)$, а фаза приобретает характер генератора с индуктивным коэффициентом мощности для угла δ_W . Нужно заметить, что анализ схемотехники выполнен для идеализированного режима, без учёта несинусоидальности токов, а рассмотренные варианты включения обмоток трёхзонной машины относят к наиболее простым. При учёте насыщения стали магнитопровода в расчетах цепей приходится применять метод гармонического баланса, а взаимные индуктивности соседних фаз учитывать в матричном виде. Поэтому анализ задачи существенно усложняется, а характер распределения токов и магнитных потоков несколько изменяется.

Тем не менее, полученные закономерности позволяют сформулировать комплекс требований к инвертору, среди которых следует учесть возможность гибкого и раздельного перехода фаз из генераторного режима в

режим электропотребления (рекуперации) мощности. При этом в алгоритмах ШИМ-управления нужно предусмотреть коррекцию для разнородной динамически изменяющейся нагрузки при переходе от емкостного характера к индуктивному и наоборот. Детализированный анализ динамических режимов работы трёхфазного инвертора на индукционную машину при наличии технологических реверсов следует изучить особенно тщательно, для выявления предельных значений изменения фазовых углов.

Ниже, на рис. 5, показаны некоторые результаты моделирования электромагнитного режима индуктора, полученные при анализе распределения магнитной индукции в обмотках w_1, w_2, w_3, w_4 и ярме (рис. 3).

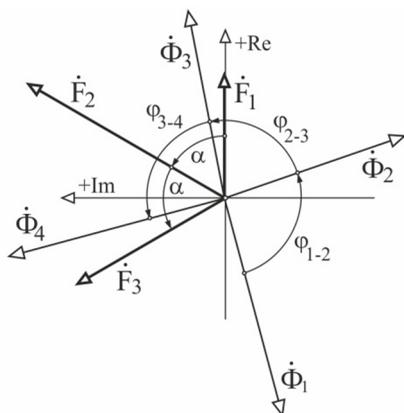


Рис. 5. Векторные диаграммы магнитных потоков ИМ

По векторной диаграмме можно заметить, что инвертированная МДС второй фазы индукционной машины приводит к относительно равномерному распределению магнитных потоков $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ в зубцах, при их фазовом сдвиге, близком к $\pi/2$. Причём тяговые усилия индукционной машины оказываются распределёнными равномерно по всему габариту индуктора при фазовых сдвигах $\varphi_{1,2}, \varphi_{2,3}, \varphi_{3,4}, \varphi_{4,1}$. Оценку уточнённой картины распределения бегущего поля с учетом насыщения стали и

взаимной индуктивности обмоток относят к последующему этапу оптимизации режимных параметров ИМ [7]. Нужно заметить, что интерфейс программной среды Ansys позволяет создавать численные модели большого размера, состоящие из модулей для разных подсистем [9]. При этом далеко не всегда рационально генерировать гибридные модели, учитывающие особенности гидродинамики и температурного поля расплава, интенсивность магнитного поля индуктора в совокупности с электромагнитными режимами системы электропитания. В большинстве случаев расчёт и моделирование режима инвертора и далее – системы электроснабжения – можно разграничить с моделированием электромагнитного режима индуктора. Опираясь на параметры намагничивающих токов в обмотках, можно рассчитать распределение магнитных потоков в ярме и зубцах и определить

тяговые характеристики индукционной машины продольного магнитного поля.

Анализ схемотехники подключения многофазных транзисторных инверторов для широкого перечня индукционных машин, в трёх-, четырёх-, шестизоном исполнении представляет собой объёмную задачу, из решения которой можно получить исчерпывающие сведения о номинальных и предельных режимах работы частотных преобразователей. Систематизация сведений об оптимальных согласованных несимметричных режимах работы инверторов позволит сформулировать строгие требования для разработчиков и проектировщиков силового электронного оборудования, предназначенного для металлургических комплексов перемешивания сплавов алюминия.

Список литературы

1. *Туарин, А. А.* The structure of electromagnetic stirrers // Znanstvena Misel Journal / Global Science Center LP, Lubljana, №20-1, 2018. – P. 50-57.
2. *Вольдек, А. И.* Искажение симметрии напряжений и токов в индукционных машинах с разомкнутым магнитопроводом / А.И. Вольдек // Известия вузов. Электротехника. – 1960. – № 5. – с. 78.
3. *Круминь, Ю. И.* Взаимодействие бегущего магнитного поля с проводящей средой/ Ю.И. Круминь. – Рига: Зинатне, 1969. – 259 с.
4. *Чаплыгин, Е. Е.* Несимметричные режимы трехфазного преобразователя с коррекцией коэффициента мощности/ Е.Е. Чаплыгин // Электричество. – 2005. – № 9. – С.55-62.
5. *Мыцык, Г. С.* Трехфазные инверторы напряжения, нечувствительные к несимметрии нагрузки / Г.С. Мыцык, Хлаинг Мин У. – М.: Вестник МЭИ. – № 4. – 2016. – С.62-68.
6. *Баранов, Г. А.* Расчет и проектирование индукционных МГД-машин с жидкометаллическим рабочим телом / Г.А. Баранов, В.А. Глухих и др. – М.: Атомиздат, 1978. – 248 с.
7. *Кинев, Е. С.* Параметрическая оптимизация многофазных индукционных систем / Е. С. Кинев и др. // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2009. – Т. 5. – № 12. – С. 35-40.
8. *Тяпин, А. А.* Оценка глубины проникновения электромагнитной волны в расплавленный алюминий / А. А. Тяпин, В. Ю. Андрющенко, В. А. Горемыкин, Е. С. Кинев// Инновационные научные исследования: теория, методология, практика: сборник статей XV Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2018. – С. 27-34.
9. *Морозов, Е. А.* ANSYS в руках инженера / Е. А. Морозов, А. Ю. Муйземнек, А. С. Шадский. – М.: Ленанд, 2018. – 456 с.

Материал поступил в редколлегию 11.10.18.