

А. А. Тяпин^{1,2}, Е. С. Кинев²
(г. Красноярск, ¹Сибирский федеральный университет
²ООО Тепловые электрические системы)

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МГД-ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЕЙ РАСПЛАВА АЛЮМИНИЯ С IGBT-ИНВЕРТОРАМИ

POWER SUPPLY SYSTEM WITH IGBT INVERTERS
FOR MHD STIRRERS OF ALUMINUM MELT

Показана структура системы электропитания МГД-индукторов, предназначенных для перемешивания жидкого алюминия в печах. Обозначены основные проблемы улучшения качества электроэнергии в сети. Предложен способ комбинированного подключения двухфазных и трехфазных линейных индукционных машин металлургического назначения с применением частотных IGBT-инверторов.

The structure of the power supply system for MHD inductors intended for stirring liquid aluminum in furnaces is shown. The main problems of improving the quality of electricity in the network are identified. A method is proposed for the combined connection of two-phase and three-phase linear induction machines for metallurgical purposes using frequency IGBT inverters.

Ключевые слова: Линейная индукционная машина, МГД-индуктор, частотный инвертор, трехфазная распределительная сеть, система электроснабжения.

Keywords: Linear induction machine, MHD inductor, frequency inverter, three-phase distribution network, power supply system.

Введение. Для перемешивания жидкого алюминия в миксерах и печах применяют линейные индукционные машины (ЛИМ) с укороченными индукторами при разном количестве фаз [1]. Стационарные индукторы имеют хорошую надежность и нередко сохраняют работоспособность даже после 20 лет интенсивной эксплуатации. В тоже время тиристорные источники питания прежних поколений, как правило, морально устарели и физически изношены. Поэтому на этапе реконструкции реальна ситуация применения современных IGBT-инверторов, которые должны обеспечивать электропитание двухфазных индукторов и современных – трехфазных [2].

Пример архитектуры для действующей системы электропитания (СЭП) комплекса электромагнитного перемешивания расплава алюминия, для пары миксеров емкостью 50 тонн, показан на рис. 1. Индукционные МГД-машины с различным числом фаз имеют не только разную конструкцию, но и разные режимы работы [3]. В зависимости от требуемой технологической эффективности и стоимости проекта могут использоваться трех, четырех,

шести или восьмизонные ЛИМ. Поэтому в системе электроснабжения и АСУ ТП комплекса МГД-перемешивания следует предусмотреть корректное сопряжение существенно различающихся источников питания с собственным контроллерным управлением [4].

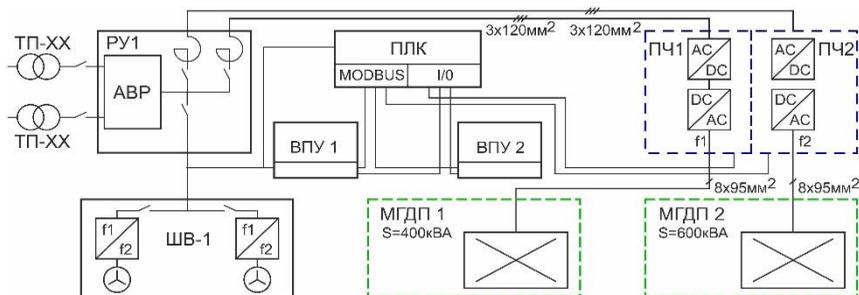


Рис. 1. Упрощенная архитектура системы электропитания

При этом непременно присутствует условие универсальности СЭП, чтобы старый двухфазный индуктор, можно было, при необходимости, заменить на новый, трехфазный или многофазный. Помимо конструктивных и режимных особенностей для всех типов ЛИМ следует обеспечить электромагнитную совместимость индукционного комплекса с цеховым оборудованием [5]. Для снижения влияния индукционного оборудования на сеть нередко применяют разделительные трансформаторы [6]. Однако для мощных комплексов такое решение оказывается экстремально дорогостоящим.

Постановка задачи. Для согласованной работы двухфазных и трехфазных индукторов в едином комплексе МГД-перемешивания расплава алюминия необходимо разработать структуру СЭП, сопряженной с распределительной сетью и системой электроснабжения предприятия, обеспечивающую нужную технологическую эффективность, приемлемое качество электроэнергии, высокую надежность и гибкость управления режимами, посредством АСУ ТП верхнего уровня. Помимо трехфазных МГД-машин СЭП должна быть адаптирована для работы с многофазными индукторами шести- и восьмизонной конструкции, обеспечивающими повышенную технологическую эффективность.

Решение. Для построения эффективной и недорогой СЭП необходимо проанализировать режимы комплекса электромагнитного перемешивателя расплава алюминия, алгоритмы работы системы управления, структуру сетевого подключения и схемотехнику электропитающего оборудования, рассчитать потери и оценить динамику [7 – 11].

Схема силового модуля мощного двухуровневого транзисторного инвертора восьмизонной ЛИМ показана на рис. 2.

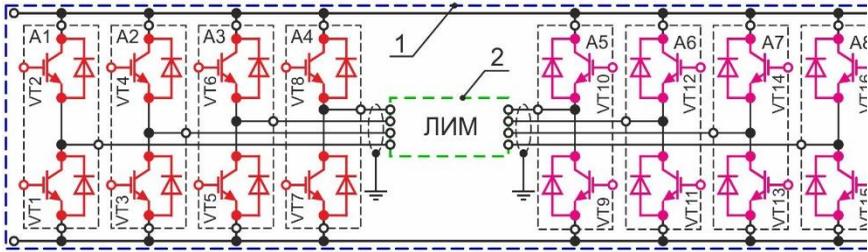


Рис. 2. Схемное решение универсального силового модуля инвертора

Низкочастотный инвертор – 1, линейная индукционная машина – 2. В зависимости от комплектации частотного преобразователя, алгоритмов работы ШИМ-контроллера и стратегии управления ключами, инвертор можно применить для питания, как двухфазных, так и многофазных индукторов обновленной серии ЛИМ. Тот же инвертор с модифицированной системой управления пригоден для электропитания двухфазных индукторов поперечного поля. Необходимое количество стоек и другое оснащение инвертора определяют на этапе решения инженеринговой задачи, при адаптации оборудования под конкретные индукторы, режимы электрической сети и системы электроснабжения [12, 13].

Характерные кривые, потребляемых трехфазным комплексом МГД-перемешивания мгновенных токов, показаны на рис. 3. В целом вид характеристик определяется работой выпрямителей, однако явно видно присутствие модулирующей огибающей, на частоте около 2 Гц, обусловленной рабочим режимом индукционного комплекса.

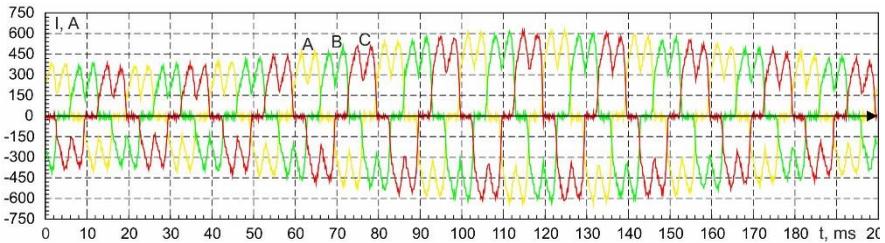


Рис. 3. Динамика потребляемых МГД-перемешивателем токов

Судя по характеристикам рис. 3, искажение формы токов потребления, может достигать 70-80 %. Такие режимы крайне неблагоприятно отражаются на качестве электроэнергии, особенно, при относительно слабой цеховой сети. Одно из крайних проявлений сопутствующего искажения напряжений показано ниже. Мгновенные кривые линейных напряжений системы электроснабжения ограниченной мощности показаны на рис. 4. Без

специальных средств фильтрации высших гармоник, значения коэффициента искажения напряжений, могут достигать 10-12 % и более.

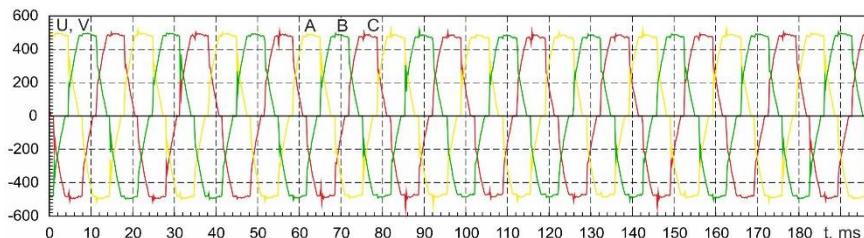


Рис. 4. Мгновенные напряжения цеховой сети при наибольшей нагрузке

Включение фильтрующих электромагнитных дросселей и силовых токоограничивающих реакторов несколько улучшает ситуацию, однако не позволяет в полной мере обеспечивать надлежащее качество электроэнергии в системах электроснабжения. Это особенно важно учитывать при поставке оборудования на экспорт. Практический анализ режимов электропотребления с применением измерительного оборудования показывает, что вопрос применения на входе индукционного комплекса специального трансформатора отнюдь не праздный. При тщательном учете жестких требований европейских директив по электромагнитной совместимости, рассмотренная выше архитектура системы электропитания оказывается непригодной [14]. Вместе с тем, при разработке вариантов структуры системы электропитания и выборе оборудования окончательное решение определяется на основе технико-экономических расчетов с учетом требований отечественных стандартов [15].

Похожие негативные последствия для качества электроэнергии можно наблюдать и в отношении коэффициента несимметрии. Наиболее заметно это при использовании в качестве МГД-перемешивателей индукционных машин с числом обмоток не кратным трем. Несколько меньшим влиянием на качество напряжения обладают трехфазные и шестифазные машины, однако технологическая инверсия средней фазы ЛИМ также негативно сказывается на симметрии электромагнитного режима индукционного комплекса [16]. При компоновке оборудования на промышленной площадке с мощными индукторами приходится решать задачи анализа распределения токов в проводниках и электромагнитной совместимости вплоть до оценки возможностей использования коротких сетей [17, 18].

Пример одного из вариантов схемного решения при построении универсального силового звена для МГД-перемешивателя показан на рис. 5. Совмещение в едином комплексе двухфазного индуктора МГДП 1 и шестифазного восьмизонного индуктора МГДП 2 становится возможным при использовании силового звена по рис. 2. Шина постоянного тока в двоярном инверторе (рис. 5) показана комбинированной, а алгоритмы работы ШИМ-

контроллера должны обеспечивать возможность двухчастотного подключения линейной индукционной машины, а также импульсного электропитания.

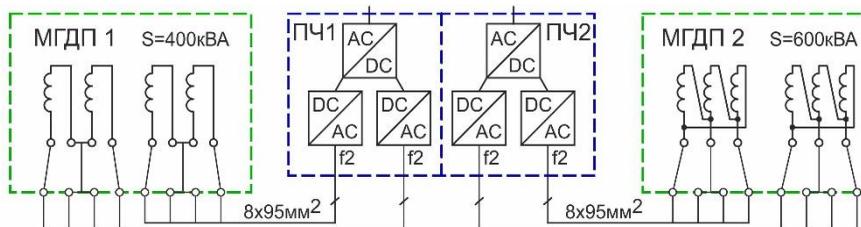


Рис. 5. Схема электропитания силовых звеньев инвертор – индуктор

Практическую привязку разрабатываемой архитектуры системы электропитания выполняют на месте проведения реконструкции с использованием цеховой планировки. Необходимо заметить, что естественный коэффициент мощности ЛИМ крайне мал и не превышает значений 0,05-0,1. Поэтому наряду с мерами противодействия искажениям решают задачи компенсации реактивной мощности.

Заключение. Предложенный подход к разработке структуры системы электропитания МГД-перемешивателей с индукторами разной конструкции позволяет совместить разнородное оборудование в ходе реконструкции производства. При этом существует возможность обновления как силовых узлов, так и системы управления МГД-комплексов. Помимо удобства конфигурирования, разных вариантов архитектуры системы электропитания, предусмотрена возможность ослабить влияние частотных преобразователей на сетевое напряжение и улучшить качество электроэнергии. Одним из средств снижения несинусоидальности токов в фазах системы электроснабжения, повышения коэффициента мощности, а также уменьшения несимметрии и несинусоидальности напряжений распределительной сети следует рассматривать использование специального разделительного трансформатора, в совокупности применением с локальным применением фильтрокомпенсационных устройств.

Список литературы

1. Кинев, Е.С. Схемотехника подключения IGBT-инвертора к многофазной индукционной машине/ Е.С. Кинев, А.А. Тяпин // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. II Международной научно-практической конференции. – Брянск: БГТУ, 2018. – Ч.1. – С. 208-215. – DOI: 10.30987/conferencearticle_5c19e61d557532.76134464.
2. Тяпин, А.А. Двухфазная индукционная нагрузка в трехфазной распределительной сети / А.А. Тяпин, Е.С. Кинев // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2020. – № 1. – С. 42-51. – ISSN 2071-2219. – DOI: 10.18635/2071-2219-2020-1-42-51.
3. Тяпин, А. А. Двухфазная линейная машина с IGBT-инвертором/ А. А. Тяпин, В. И. Пантелеев // В кн.: Электроэнергетика: XV всероссийская (VII международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – 2020. – С. 82.

4. *Тяпин, А.А.* IGBT-инвертор с биполярной синусоидальной ШИМ для двухфазной линейной МГД-машины/ А.А. Тяпин, Е.С. Кинев // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Международной научно-практической конференции. – Брянск: БГТУ, 2019. – С. 96-102. – DOI: 10.30987/conferencearticle_5e028210dbc298.14572422.
5. *Kinev E., Tyapin A.* Improving the quality of electricity of a metallurgical enterprise by balancing the induction load. *Norwegian Journal of development of the International Science*. Oslo, 2020, No 40. Vol. 1. pp. 33–40. – ISSN 3453-9875.
6. *Кинев, Е.С.* Технология применения модульного насоса-дозатора расплава алюминия на стационарном миксере/ Е. С. Кинев, А. А. Тяпин // В кн.: Сборник научных работ 65 Международной научной конференции Евразийского Научного Объединения. – Москва: ЕНО, 2020. – № 7 (65). – Ч. 2. – С. 110-114. – ISSN: 2411-1899
7. *Kinev E.S., Tyapin A.A., Litovchenko A.V.* Analysis of the closed circuit network in the power supply system of a metallurgical enterprise. *The scientific heritage*. Budapest, 2020. No 49-1, Vol. 1. pp. 69-74. – ISSN 9215-0365.
8. Фризен, В.Э. Расчет и выбор электрооборудования низковольтных распределительных сетей промышленных предприятий/ В.Э. Фризен, С.Л. Назаров // Учебное пособие. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УФУ им. Б.Н.Ельцина, 2018. – 180с.
9. *Железко, Ю. С.* Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов/ Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, О. В. Савченко. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2004. – 280 с.
10. *Железко, Ю. С.* Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов/ Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
11. *Карпов, Е.А.* Моделирование переходных процессов в линейных и нелинейных электрических цепях. Учебно-методическое пособие/ Е.А. Карпов, В.Н. Тимофеев, Ю.С. Перфильев, М.Ю. Хацаюк, М.В. Первухин. – Красноярск: СФУ, 2019. – 189 с. – ISBN: 978-5-7638-4081-0
12. *Кинев, Е.С.* Особенности расчета режима сети с двусторонним питанием/ Е.С. Кинев, А.А. Тяпин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2020. – № 7.– С. 12-18. – ISSN: 2074-9635.
13. *Герасименко, А. А.* Электроэнергетические системы и сети: Конспект лекций/ А. А. Герасименко, Е. С. Кинев, Т. М. Чупак. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 279 с.
14. Directive 2014/30/eu of the European parliament and of the council. 29.3.2014 Official Journal of the European Union L 96/79. 28 p.
15. ГОСТ Р 51317.2.5-2000 (МЭК 61000-2-5-95). Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 44 с.
16. *Кинев, Е. С.* Обобщенная схема замещения укороченной линейной индукционной МГД-машины/ Е. С. Кинев, А. А. Тяпин, К. А. Байкова, А.В. Литовченко // В кн.: Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: Сборник научных статей VII междунар. науч. конф. 30-31 июля 2020 г.– Казань: ООО «Конверт», 2020. – Ч.1. – С. 243-247. – ISBN 978-5-6044722-0-0.
17. *Алиферов, А.И.* Симметрирование электрических параметров расшитованного жесткого токоподвода руднотермической электропечи/ А.И. Алиферов, Р.А. Бикеев, Л.П. Горева, А.Ю. Игнатенко, А.В. Бордунова // Электротехника. – 2014. – № 12. – С. 54-58.
18. *Алиферов, А.И.* Метод расчета параметров шихтованных пакетов руднотермических печей/ А.И. Алиферов, Р.А. Бикеев, Л.П. Горева, А.Ю. Игнатенко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. – № 6. – С. 41-44.

Материал поступил в редколлегию 18.09.20.