ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА БУДУЩЕГО: ИНВЕРТОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОСТОЯННЫЙ ТОК

АВТОРЫ:

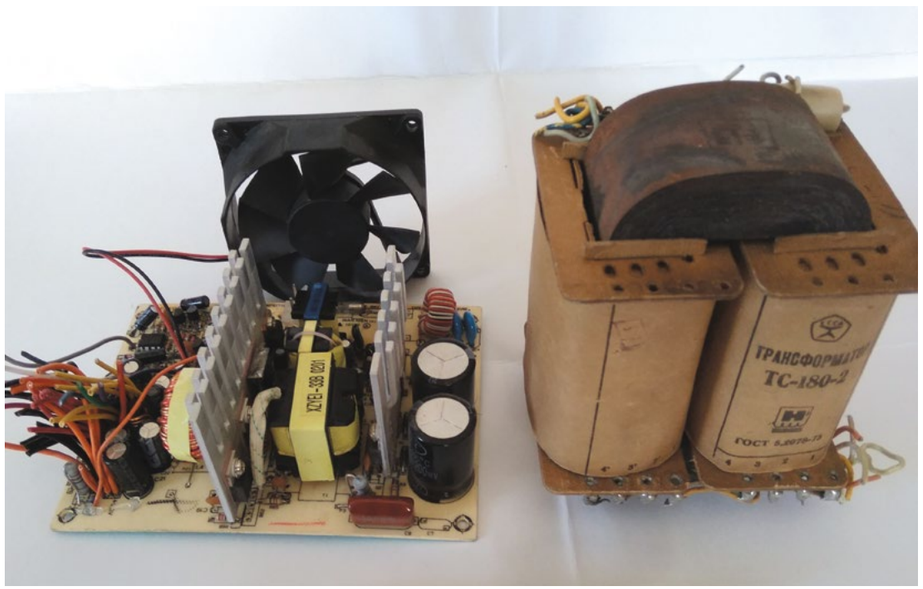
А.-З.Р. ДЖЕНДУБАЕВ,
Д.Т.Н.,
СЕВЕРО-КАВКАЗСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ

Ю.Г. КОНОНОВ,
Д.Т.Н.,
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Э.А.-З. ДЖЕНДУБАЕВ,
СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Несомненным положительным эффектом перехода электротехнического оборудования на постоянный ток является сокращение затрат на сооружение воздушных и кабельных линий, уменьшение потерь мощности и увеличение пропускной способности. Перевод электроэнергетики на постоянный ток позволит, помимо всего прочего, снять ограничения по частоте вращения генератора и турбины.

Ключевые слова: инвертор; конвертор; полупроводниковый трансформатор; асинхронный генератор; HVDC; FACTS; FDCTS; SMART GRID.



Плата инверторного блока питания (слева) и трансформатор блока питания предыдущего поколения (справа)

ВВЕДЕНИЕ

Создание высокоэффективных биполярных транзисторов с изолированным затвором (Insulated-gate bipolar transistor, IGBT) и их использование в инверторах с широтно-импульсной модуляцией привело к качественным изменениям в области электроэнергетики и электротехники. Инверторные технологии нашли применение в электротехнических устройствах, чья мощность охватывает огромный диапазон, например, от зарядных устройств и блоков питания, мощность которых измеряется в десятках ватт, до преобразователей высоковольтных линий электропередачи (HVDC) и статических синхронных компенсаторов (STATCOM), мощность которых может измеряться в сотнях мегавар и более.

Причины столь стремительного и широкого внедрения, естественно, скрываются в технико-экономических показателях. Однако имеются уровни напряжений, при которых инверторы не получили достойного применения. В силу этого детальнее рассмотрим диапазоны напряжений, при которых инверторные технологии пока не нашли широкого применения. Также проанализируем величину и характер напряжения и тока на входе и выходе устройств с инверторами, что позволит оценить возможность «легализации» скрытых потребителей постоянного тока путем их непосредственного подключения к выходу подстанций с конверторами постоянного тока (DC/DC), избавляя их от необходимости устанавливать индивидуальные преобразователи AC/DC. Следует отметить, что количество и мощность таких потребителей стремительно растет, а количественные изменения, как известно, рано или поздно приводят к качественным изменениям, в данном случае — к неизбежному переходу энергосистем на постоянный ток.

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ УСТРОЙСТВА, В КОТОРЫХ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ИНВЕРТОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Известно, что большинство высоковольтных линий электропередачи постоянного тока (HVDC) используют напряжение от 100 до 800 кВ. Лидером в этой области является ультравысоковольтная линия передачи постоянного тока (UHVDC) напряжением 1100 кВ, построенная в Китае [1]. С помощью этой линии передается 12 ГВт на расстояние 3300 км. Поскольку такие линии передают мощность в сеть переменного тока, то преобразование постоянного тока в переменный ток (DC/AC) частотой 50 (60) Гц осуществляется с помощью инвертора. Для развязки инвертора и сети часто используется групповой силовой трансформатор, состоящий из трех однофазных трансформаторов. При передаче этой линией мощности в сеть постоянного, а не переменного тока можно на порядок и более снизить массогабаритные показатели силового трансформатора, включенного между инвертором и выпрямителем. Последнее становится возможным за счет повышения, например, до 60 кГц частоты инвертора. Достоинства и недостатки высоковольтных линий постоянного тока подробно описаны в специальной литературе [см., напр., 2, 3].

Наряду с высоковольтными линиями электропередачи постоянного тока инверторы находят применение в статических синхронных компенсаторах (STATCOM), которые являются одной из разновидностей гибких систем передачи переменного тока (FACTS) и обеспечивают регулирование реактивной мощности в сетях переменного тока. Следует подчеркнуть, что в статических синхронных компенсаторах используются инверторы с широтно-импульсной модуляцией, поэтому они могут стать основой для создания подстанций с конверторами (DC/DC).

Далее перейдем к рассмотрению области, в которой работают низковольтные устройства, в основе которых также лежат инверторные технологии. Их мощность существенно меньше мощности высоковольтных устройств, но их количество, измеряемое в сотнях миллионов, впечатляет и обусловливает значительный экономический эффект, который может быть получен благодаря применению этих технологий.

НИЗКОВОЛЬТНЫЕ УСТРОЙСТВА, В КОТОРЫХ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ИНВЕРТОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Наиболее часто в повседневной жизни мы используем бытовые электротехнические устройства, характеристики которых качественно изменились, а многие и появились только благодаря инверторным технологиям. К ним относятся зарядные устройства сотовых телефонов, светодиодные лампы, блоки питания различных устройств, инверторные стиральные машины, холодильники и кондиционеры. Последние три устройства имеют более высокую цену (как и все новое), но в ходе эксплуатации с лихвой окупают первоначальные капитальные затраты, что достигается за счет использования контроллера, который с помощью инвертора управляет электродвигателем, поддерживая оптимальную частоту вращения его ротора во всех режимах работы. Все это позволяет существенно снизить потери электроэнергии, а следовательно, и эксплуатационные затраты по сравнению с аналогичными

устройствами предыдущего поколения, которые в основном работали в старт-стопном или в лучшем случае в многоскоростном режиме.

Для оценки степени улучшения характеристик устройств сравним зарядное устройство сотового телефона с инвертором и выпрямителем (новое поколение, рис. 1 слева) с адаптером переменного тока в виде трансформатора (старое поколение, рис. 1 справа).

Из рис. 1 видно, что габариты зарядного устройства сотового телефона более чем в три раза меньше габаритов адаптера. Мощности устройств составляют 10 и 7,5 Вт соответственно. При этом масса первого равна 75 г, а второго — 335 г. Таким образом, массогабаритные показатели у нового поколения существенно лучше.

Далее рассмотрим электротехнические устройства большей мощности, например, блок питания для компьютера на основе инвертора и блок питания, который использовался в телевизоре до изобретения IGBT-транзисторов и инверторов. Различия с точки зрения габаритов и массы основных трансформаторов (рис. 2) блоков питания впечатляют: первый весит 64 г, второй — 2,9 кг. Удельные массы трансформаторов при этом составляют 4,688 и 0,062 кВА/кг соответственно. Следует отметить, что в данном случае мощность трансформатора первого блока питания больше, чем второго — 300 ВА против 180 ВА. Для объяснения этих качественных изменений воспользуемся известным выражением электромагнитной мощности трансформатора [4]:

$$S_{эм} = E_2 I_2 = \frac{2\pi f W_2 \Phi_m I_2}{\sqrt{2}}, \qquad (1)$$

где f — частота; W_2 — число витков вторичной обмотки трансформатора; Φ_m — амплитудное значение магнитного потока трансформатора; I_2 — ток вторичной обмотки. Из выражения (1) следует, что с увеличением частоты при неизменной электромагнитной мощности можно уменьшить магнитный поток и число витков, что будет сопровождаться улучшением массогабаритных показателей трансформатора. Таким образом, наличие инвертора в блоке питания играет ключевую роль в снижении размеров и массы его основного трансформатора, поскольку к первичной обмотке этого трансформатора подводится напряжение частотой 20–150 кГц, а не частотой 50 (60) Гц, как в случае трансформатора блока питания предыдущего поколения.

Конечно, наличие инвертора в блоке питания усложняет его конструкцию и ухудшает массогабаритные и экономические показатели (см рис. на стр 58). Но даже в этом случае масса платы блока питания с учетом вентилятора охлаждения составляет всего 428 г против 2,9 кг одного лишь трансформатора ТС-180–2 без платы с выпрямителем, электролитическими конденсаторами, дросселем и стабилизатором напряжения и т.д. К тому же с ростом частоты заметно улучшаются массогабаритные показатели не только трансформатора, но и LC–фильтра.

Таким образом, проведенный анализ показал обоснованность «победы» блоков питания нового поколения на основе инверторных технологий с точки зрения массогабаритных показателей. Что касается экономических показателей, то их массовое производство уже ответило на этот вопрос.

Исходя из представленных выше данных, проведем грубую экстраполяцию массогабаритных показателей силового среднечастотного трансформатора конвертора. Для этого воспользуемся данными сухих трансформаторов мощностью 250, 1250 и 2500 кВА [5]. Рассчитаем в относительных единицах зависимость массы трансформатора от его мощности. За базисный трансформатор примем первый, указанный в табл. 1. Из этой таблицы видим, что с ростом мощности почти линейно возрастает масса трансформаторов.

Рис.1.
Зарядное устройство сотового телефона (слева) и адаптер AC/DC (справа)

МОЩНОСТЬ И МАССА СУХИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ИМЕНОВАННЫХ И ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦАХ

№	Мощность, кВА	Масса, кг	Мощность, о. е.	Масса, о. е.
1	250	800	1	1
2	1250	2500	5	3,125
3	2500	4700	10	5,9

Таблица 1

Сделаем допущение, что такое соотношение в относительных единицах соблюдается для любого пяти- и десятикратного увеличения мощности не только низкочастотного силового трансформатора, но и среднечастотного силового трансформатора конвертора DC/DC. Например, десятикратное увеличение мощности с 0,3 до 3 кВА среднечастотного трансформатора, рассмотренного выше, будет сопровождаться следующим увеличением массы: 0,064 × 5,9 = 0,378 кг. Дальнейшее пятикратное увеличение мощности до 15 кВА приводит к такому результату: 0,378 × 3,125 = 1,18 кг. При этом удельная мощность составит 15/1,18 = 12,7 кВА/кг. Подобный результат хорошо согласуется с данными, которые были получены в 1982 г. при разработке среднечастотного трансформатора для инверторного блока питания. При мощности 15 кВт его масса составляла 1 кг [6].

Предположим, что мощность среднечастотного трансформатора равна 300 кВА, тогда его масса составит 0,378 × 5,9 × 5,9 = 13,158 кг, а удельная мощность — 300/13,158 = = 22,191 кВА/кг. Несложно заметить, что масса среднечастотного трансформатора меньше массы низкочастотного в 60,7 раза. Далее определим отношение массы платы с вентилятором к массе среднечастотного трансформатора: 428/64 = 6,69. Сделаем допущение, что такое же отношение будет справедливо и для конвертора DC/DC подстанции. В этом случае его масса составит 13,158 × 6,69 = = 88 кг, что с учетом «лишних 50 кВА» в 10 раз меньше массы низкочастотного сухого трансформатора мощностью 250 кВА.

Что касается экономических преимуществ конверторов DC/DC подстанций и электроэнергетики постоянного тока на их основе, то, по всей видимости, их экономическая судьба будет мало отличаться от судьбы любых инновационных устройств, в том числе инверторных, которые были описаны выше. На начальном этапе

Рис. 2.
Основные трансформаторы инверторного блока питания (слева) и блока питания предыдущего поколения (справа)

ПАСПОРТНЫЕ ДАННЫЕ СВАРОЧНЫХ АППАРАТОВ

Технические характеристики	Тип сварочного аппарата	
	инверторный	трансформаторный
	Start 200 PFC	ТДМ-205
Сварочный ток, А	200	200
ПВ, %	60	40
КПД, %	88	58
Cos j	0,99	>0,7
Масса, кг	4,5	34
Габариты, мм	360´114´220	340´350´540

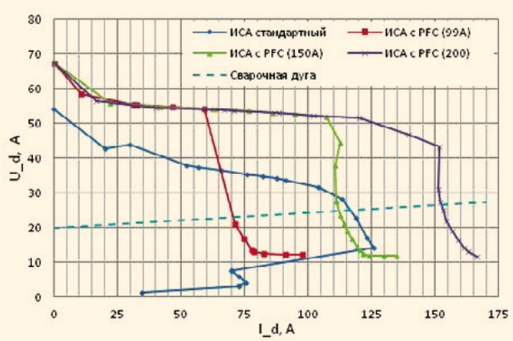
Таблица 2

из-за неоспоримых преимуществ конверторных подстанций спрос на них будет расти, несмотря на их высокую стоимость, как следствие, будут расти масштабы производства, а в итоге будет снижаться их стоимость. Авторы осознают, что полученные результаты могут оказаться достаточно приблизительными. Естественно, что более точные результаты можно будет получить только в ходе исследований, проектирования и создания опытного образца.

Далее перейдем к инверторным устройствам, мощность которых составляет несколько киловатт. К ним относятся инверторные сварочные аппараты (ИСА), которые за короткое время вытеснили трансформаторные сварочные аппараты (ТСА) предыдущего поколения. И если в начале их стоимость была запредельной, то со временем они стали доступнее по цене и лучше по параметрам. В табл. 2 представлены паспортные данные сварочных аппаратов двух типов.

У первого сварочного аппарата трансформатор подключается к инвертору с широтно-импульсной модуляцией, а у второго — непосредственно к сети 50 Гц. Как видно из табл. 2, при одинаковом сварочном токе все показатели у ИСА лучше, чем у ТСА. Он в 7,6 раза легче, а его объем, исходя из габаритов, в 7,1 раза меньше, чем у ТСА. Сравнение коэффициентов мощности также не в пользу ТСА. Высокий коэффициент мощности ИСА объясняется наличием у него корректора коэффициента мощности (PFC), который позволяет ему работать в слабых сетях при напряжениях от 177 до 265 В, т. е. при напряжениях 220 ± 20 %. Стандартный ИСА не обладает такими характеристиками. Следует отметить и то, что токи холостого хода у ИСА существенно меньше, чем у ТСА. Возможно, конвертор DC/DC подстанции будет обладать такими же возможностями, как ИСА. Несмотря на неоспоримые достоинства, перечисленные выше, главным достоинством ИСА являются его статические и динамические характеристики, позволяющие проводить высококачественную сварку даже начинающему сварщику. Естественно, что эти характеристики

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНВЕРТОРНЫХ СВАРОЧНЫХ АППАРАТОВ (ИСА) И ХАРАКТЕРИСТИКА СВАРОЧНОЙ ДУГИ (ПУНКТИРНАЯ ЛИНИЯ)



Обозначения: U_d и I_d – соответственно выпрямленное напряжение и ток, PFC (Power Factor Correction) – корректор коэффициента мощности

Рис. 3

формируются контроллером, который управляет инвертором сварочного аппарата. На рис. 3 представлены внешние характеристики двух ИСА и известная характеристика сварочной дуги. Один из них стандартный, а другой с корректором коэффициента мощности (PFC). Данные характеристики были получены экспериментально.

Наличие контроллера в ИСА позволяет формировать внешние характеристики любой формы. Начальный участок внешних характеристик мягкий, потом идет более жесткий, а рабочий участок очень мягкий, почти источник тока. В профессиональных ИСА есть возможность самостоятельно формировать внешние характеристики, наряду с этим имеются многочисленные функции, автоматически вступающие в действие и улучшающие процесс и качество сварки. Частью этих функций обладают и бюджетные ИСА, например стандартный ИСА, представленный в работе, имеет функцию «ANTI STICK» (антизалипание), благодаря которой производится автоматическое снижение сварочного тока при залипании электрода и возвращение в нормальное состояние после устранения этой проблемы (см. рис. 3). Возможность конвертора DC/DC подстанции формировать внешнюю характеристику позволяет ему не только иметь жесткую внешнюю характеристику, но и ограничивать токи перегрузки [7].

Известно, что ТСА плохо работают при значительных изменениях входного напряжения, не предоставляют возможность изменять форму внешней характеристики, кроме жесткости, а также не обладают встроенными функциями. Причем этот ТСА подключается к сети переменного тока и осуществляет сварку на переменном токе, т. е. ведет себя как силовой трансформатор подстанции переменного тока, только он не имеет устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН).

Таким образом, можно утверждать, что преимущества подстанций с конверторами постоянного тока (DC/DC) над существующими трансформаторными подстанциями переменного тока будут находиться в такой же пропорции, что и достоинства инверторных сварочных аппаратов над трансформаторными.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНВЕРТОРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СРЕДНЕМ УРОВНЕ НАПРЯЖЕНИЙ

Следует отметить, что инверторные технологии активно используются при преобразовании не только постоянного тока в переменный (DC/AC), но и переменного тока в переменный (AC/AC) с возможностью изменения величины напряжения и частоты на выходе устройства. Поскольку они разрабатывались для развязки сетей среднего и низкого напряжений и замены обычных силовых трансформаторов 10/0,4 кВ, то получили различные названия, в большинстве которых присутствует слово трансформатор. В этот процесс внесли свой

СИНОНИМЫ СЛОВОСОЧЕТАНИЯ «КОНВЕРТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (AC/AC)»

№	Названия		Источник
1	Electronic Transformer (1968)	Электронный трансформатор	[8, 9]
2	Solid-State Transformer (SST, 1980)	Полупроводниковый трансформатор	[8–10]
3	Intelligent Universal Transformer (IUTTM)	Интеллектуальный универсальный трансформатор	[8, 9]
4	Power Electronics Transformer (PET)	Силовой электронный трансформатор	[8, 9]
5	Electronic power transformer (EPT)	Электронный силовой трансформатор	[8–10]
6	Energy Control Center (ECC)	Центр управления энергией	[8, 9]
7	Energy Router	Энергетический маршрутизатор	[8, 9]
8.	Smart Transformer	Умный трансформатор	[9]

Таблица 3

вклад как авторы изобретений и публикаций, так и разработчики конверторов переменного тока (AC/AC). Часть этих названий представлена в табл. 3.

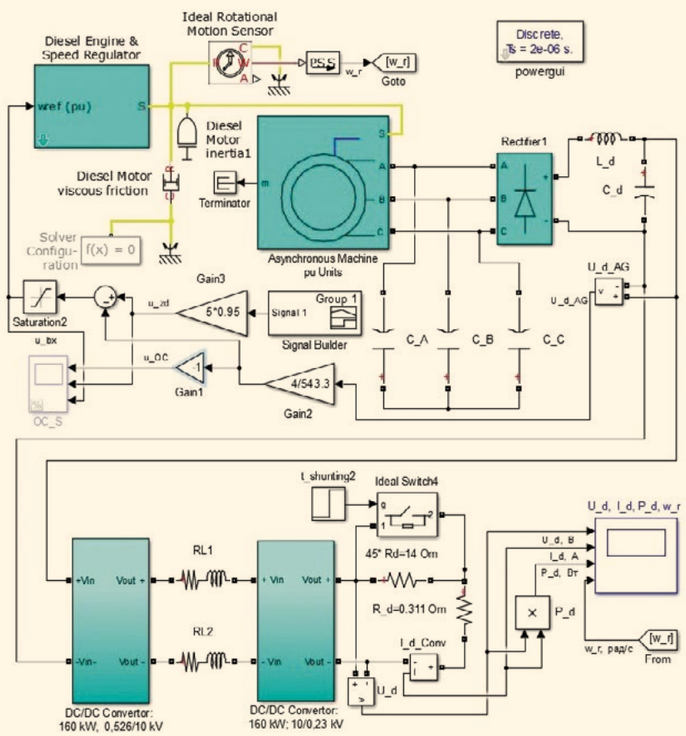
Наиболее часто в литературе встречается название «полупроводниковый трансформатор» и сокращение SST. Наличие двух инверторов в этих устройствах обеспечивает полный контроль над напряжением на выходе и током, а следовательно, и контроль над потоком активной и реактивной энергии. В силу этого SST рассматривается как ключевой элемент умных сетей [9]. Как и в конверторе постоянного тока, так и в полупроводниковом трансформаторе (SST) используется среднечастотный трансформатор. Причем конвертор постоянного тока (DC/DC) имеет существенное преимущество над полупроводниковым трансформатором, т. е. конвертором AC/AC: в первом конверторе используются восемь транзисторов (4 транзистора для инвертора и 4 транзистора для выпрямителя) и один среднечастотный трансформатор, а во втором — 16 (4 транзистора для выпрямителя № 1, 4 транзистора для инвертора № 1, аналогично для выпрямителя № 2 и инвертора № 2) в случае однофазного варианта и 48 транзисторов и три трансформатора при трехфазном исполнении [10], таким образом, он обладает более простой и надежной системой управления.

Конверторы DC/DC позволяют управлять потоком электроэнергии, как и полупроводниковый трансформатор (SST). Поэтому их можно использовать в гибких передающих системах постоянного тока (FDCTS) точно так же, как используются SST в гибких передающих системах переменного тока (FACTS) [11].

Таким образом, полупроводниковый трансформатор переменного тока может стать хорошей основой для создания конверторов постоянного тока, которые могут быть легко адаптированы под существующую систему управления SST. В настоящее время ведутся довольно интенсивные исследования и разработки по оптимизации материалов магнитопровода, а также по конструкции основных трансформаторов конверторов, в том числе и для Smart Grid [8, 10, 12]. Наряду с этим ведущие электротехнические фирмы, такие как ABB и General Electric, уже создали конверторы среднего напряжения [13]. Кстати, библиография работы Дж. В. Колара [13] насчитывает 76 публикаций, которые посвящены инверторам и областям, в которых они используются.

Переход от трехфазной системы переменного тока к системе постоянного тока позволяет снизить и стоимость сооружения ЛЭП, и потери в ней. Так, при одинаковых передаваемых мощностях, сечениях и допустимых напряжениях ($\pm U_d = \sqrt{2}U_{AB}$) потери в биполярных линиях постоянного тока будут меньше на 25 % при использовании всего двух проводов (или жил кабеля) вместо трех [13].

МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА



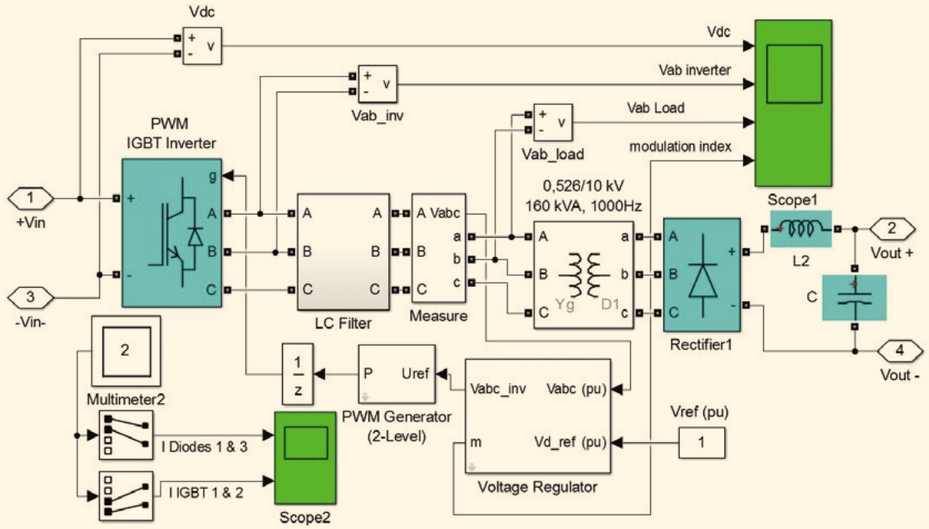
Обозначения: Diesel Engine & Speed Regulator — блок дизельного двигателя и регулятора его скорости; Ideal Rotational Motion Sensor — блок идеального датчика вращения; Goto — блок для «беспроводной» передачи сигнала с данными частоты вращения ротора приемнику From, где w_r — идентификатор сигнала; Diesel Motor viscous friction — блок вязкого трения дизельного двигателя; Diesel Motor inertia — блок момента инерции дизельного двигателя; Terminator — блок для заглушки выходного порта; Asynchronous Machine pu Units — блок асинхронной машины, параметры которой заданы в относительных единицах; Rectifier — блок выпрямителя; L_d — блок сопротивлений, в котором задана индуктивность LC фильтра, и C_d — блок сопротивлений, в котором задана емкость LC фильтра; Saturation — блок насыщения (ограничения сигнала); Gain — блок масштабирования сигнала; Signal Builder — блок формирования сигналов; C_A, C_B, C_C — блоки сопротивлений, в которых заданы значения емкости конденсаторов возбуждения генератора.

Рис. 4

«СКРЫТЫЕ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКИ» ПОСТОЯННОГО ТОКА

Все устройства с инверторными преобразователями являются скрытыми потребителями постоянного тока, потому что они в большинстве своем подключаются к сетям переменного тока. При этом напряжение и ток выпрямляются, фильтруются и подводятся к инвертору. Мощность и количество таких устройств неуклонно растет. И первые «ласточки», которые свидетельствуют о необходимости перехода на постоянный ток, это центры обработки данных, в которых 380 В (AC) переменного тока однократно преобразуются в напряжение 380 В (DC) постоянного тока, к которому подключаются серверы и остальное оборудование [14]. В подобных центрах с целью повышения надежности электроснабжения устанавливают аккумуляторные батареи, а не блоки бесперебойного питания, что сокращает на одну ступень количество преобразований тока. Таким образом, использование постоянного тока позволяет повысить энергоэффективность, надежность и упрощает обслуживание центра. На Западе существует альянс EMerge Alliance, являющийся лидером по продвижению постоянного

ПОДСИСТЕМА DC/DC CONVERTOR



Обозначения: «+Vin», «–Vin» – входные порты подсистемы DC/DC Convertor: 160 kW; 0,526/10 Kv; PWM IGBT Inverter – блок инвертора с широтно-импульсной модуляцией на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором; LC Filter – блок индуктивно-емкостного фильтра; Measure – блок с датчиками для изменения трехфазных напряжений и токов; 0,526/10 kV, 160 kVA, 1000Hz – блок трехфазного трансформатора с двумя обмотками (Three-Phase Transformer (Two Windings)); Rectifier1 – блок трехфазного выпрямителя; L2 и C – соответственно блок индуктивности и емкости LC фильтра; «Vout +» и «Vout –» – выходные порты подсистемы DC/DC Convertor: 160 kW; 0,526/10 Kv; Vref – эталонное напряжение в относительных единицах, которое задается в блоке Constant; Voltage Regulator – регулятор напряжения; PWM Generator (2-Level) – двухуровневый генератор широтно-импульсной модуляции.

Рис. 5

КРИВЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА ПРИ САМОВОЗБУЖДЕНИИ И НАБРОСЕ НАГРУЗКИ

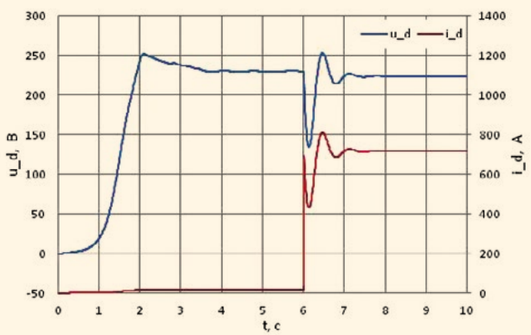


Рис. 6

тока. Этот альянс разработал стандарт для подобных центров и работает над тем, чтобы использовать те же технологичес-кие платформы беспроводного управления, которые применяются в Smart Grid, что в будущем позволит данным центрам интегрироваться с подобными сетями. В альянс входят более 90 организаций, в том числе ABB, General Electric и IEEE [15]. Повышенное внимание к центрам обработки информации вполне объяснимо, поскольку их количество и доля в мировом потреблении электроэнергии неуклонно возрастает в связи с революционным развитием информационных и телекоммуникационных технологий, облачных вычислений и т. д.

К «скрытым электроприемникам» постоянного тока можно отнести многочисленные управляемые электроприводы. Причем в них на смену системе «инверторный преобразователь частоты + асинхронный двигатель» пришла более эффективная система в виде вентильного двигателя, который представляет собой совокупность транзисторного коммутатора (инвертора) и синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) [16]. Поскольку все нерегулируемые приводы, в которых еще используются асинхронные двигатели, постепенно заменяются регулируемыми ввиду их большей эффективности, то это тоже способствует популяризации подстанций с конверторами постоянного тока (DC/DC).

Известно, что значительная часть экологических проблем связана с эксплуатацией автомобилей, в которых используются двигатели внутреннего сгорания. Это вынудило правительства многих стран принимать различные меры по замене автомобилей на электромобили, в которых также используются инверторные технологии и аккумуляторы постоянного тока [17, 18]. Массовый переход на электромобили приведет к неминуемому росту потребителей постоянного тока. Следует отметить, что, кроме электромобилей, готовятся в ближайшие годы выйти на рынок беспилотные воздушные такси (аэротакси, квад-рокоптеры для перевозки людей), в которых также используются инверторные технологии и аккумуляторы [19–21]. Это, в свою очередь, потребует изменения электроэнергетической инфраструктуры.

Однако создание зарядных станций переменного тока внутри городов, по всей видимости, является неэффективным решением, потому что на зарядку аккумулятора затрачивается намного больше времени, чем на заправку бака бензином. Наилучший вариант и для владельца, и для энергетики — это размещение розеток для зарядки аккумуляторов во всех удобных местах, например на стенах жилого дома, причем количество розеток не должно быть меньше количества квартир. Выигрыш владельцев электромобилей очевиден: во-первых, все под рукой, пока он спит, аккумулятор заряжается, во-вторых, у дома в аварийных режимах появляется «блок бесперебойного питания». Это выгодно и для энергетиков, поскольку аккумуляторы многочисленных электромобилей являются отличными накопителями энергии для уменьшения пиков нагрузки.

Рано или поздно встанет вопрос о строительстве новых подстанций. Если рассматривать вариант с подстанциями переменного тока, то в городской черте это будет достаточно сложно ввиду ограниченных возможностей по выделению новых территорий и прокладки новых коммуникаций. Решение напрашивается само собой — это демонтаж оборудования старых подстанций и размещение на их месте оборудования компактных и в разы более мощных подстанций с конверторами (DC/DC). При этом глубокий ввод от других высоковольтных подстанций с конверторами должен

осуществляться биполярной кабельной линией напряжением ± 28,58 кВ и более, вплоть до ± 89,87 кВ, ввиду возросших мощностей потребителей. Напряжение на низкой стороне конверторов может составлять ± 311,1 В (DC). В этом случае удастся объединить высоковольтную (HVDC) часть энергосистемы с низковольтной (LVDC) частью и создать единую энергосистему постоянного тока в рамках одного города, а в перспективе и всей страны. Естественно, что напряжения, представленные выше, носят условных характер, поскольку будущая шкала напряжений постоянного тока может существенно отличаться от шкалы переменного тока. Эти отличия будут зависеть от множества факторов, в том числе от стоимости и характеристик полупроводниковых элементов, а также от параметров существующих и будущих электроприемников.

В связи с развитием распределенной энергетики и ростом числа потребителей постоянного тока СИГРЭ стало уделять значительное внимание сетям постоянного тока среднего и низкого напряжения, а также микросетям [22].

ГЕНЕРАЦИЯ

В связи с бурным развитием солнечных электростанций (СЭС) встает вопрос и об инверторах, которые используются для согласования сети постоянного тока, состоящей из солнечных модулей, с сетью энергосистемы переменного тока. Следует отметить, что солнечные элементы, входящие в состав солнечных модулей, изначально являются источниками постоянной ЭДС, и поэтому их подключение непосредственно к сетям постоянного тока (при решении вопросов повышения уровня изоляции и выдачи наибольшей мощности) позволит избавиться от лишнего преобразования постоянного тока в переменный (DC/AC). В силу этого удаленные СЭС целесообразнее подключать именно к линиям HVDC.

Можно предположить, что идеальным вариантом является размещение многочисленных СЭС вдоль экватора или близко к нему, а также в пустынях, объединение этих СЭС не только континентальными, но и межконтинентальными линиями UHDC, закольцованными по меридианам и параллелям. В этом случае глобальная сеть СЭС будет иметь относительно равномерный график выработки электроэнергии и все составляющие системы постоянного тока, связанные в единое целое, будут представлять собой «живой организм», «идущий» по земле вслед за энергией солнца, причем с учетом не только суток, но и сезона года. К глобальной сети будут подключены все остальные возобновляемые и невозобновляемые источники электроэнергии, а также все глобальные (скрытые и явные) потребители энергии постоянного тока.

Естественно, что глобальная система невозможна без глобальных стандартов, и если на уровне высоких напряжений они уже сформированы, то на уровне среднего и низкого напряжений их нет или они устарели и не отвечают современным тенденциям повышения напряжения. Наличие таких стандартов позволило бы, например, при проектировании солнечных модулей СЭС рассчитывать их количество и формировать схему соединения, с тем чтобы СЭС непосредственно, т. е. без конверторов DC/DC, подключать к сети постоянного тока. То же можно сказать и о формировании напряжений аккумуляторных батарей электромобилей, которые должны подключаться к обычной сети постоянного тока, а не к специализированным зарядным станциям. Конечно,

ИЗ «СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОДСТАНЦИЙ. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ». СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.120.40.041-2010

5. Требования к системе оперативного постоянного тока

5.1. СОПТ должна обеспечивать рабочее и резервное питание следующих основных электроприемников: устройств РЗА; устройств управления высоковольтными коммутационными аппаратами (без питания приводов разъединителей и заземляющих ножей, питание приводов выключателей возможно при обосновании); устройств связи, обеспечивающих передачу сигналов и команд РЗА; устройств коммуникации, обеспечивающих передачу сигналов и команд между устройствами РЗА; устройств нижнего и среднего уровня АСУ ТП; устройств сбора информации для АСУ ТП и ССПИ; приводов автоматических вводных и секционных выключателей щитов собственных нужд (ЩСН) напряжением 0,4 кВ; устройств сигнализации.

5.4. СОПТ может иметь централизованную или децентрализованную структуру. В централизованной СОПТ применяется один комплект компонентов, в децентрализованной — два и более.

5.5. Типовой состав каждого комплекта СОПТ содержит следующие компоненты: две аккумуляторные батареи (АБ) для ПС с высшим напряжением 220–750 кВ и ПС 110 кВ с более чем 3 выключателями в распределительном устройстве высшего напряжения, одна АБ — для ПС с высшим напряжением 35 кВ и остальных ПС 110 кВ; четыре стационарных зарядных устройства (ЗУ) — по два на каждую АБ для ПС с высшим напряжением 220–750 кВ и ПС 110 кВ с более чем.

для управления процессом зарядки, возможно, потребуется некий аналог линейного регулятора, который можно назвать линейным конверторным регулятором постоянного тока. Этот регулятор относительно небольшой мощности включается последовательно в цепь между сетью и аккумулятором. Изменяя напряжение, например, на ±10 %, он будет изменять поток электроэнергии от режима потреб-ления (зарядки), холостого хода, а при необходимости и генерации. Естественно, что при наличии соответствующего интерфейса этот линейный конверторный регулятор постоянного тока сможет работать в составе Smart Grid.

К сожалению, в настоящее время на фоне традиционных источников доля электроэнергии, которую вырабатывают возобновляемые источники, относительно невелика.

В связи с этим рассмотрим преимущества, которые дает переход на постоянный ток новых видов генераций. В частности, такой переход снимает ограничение по частоте вращения ротора генератора и связанного с ним приводного двигателя (гидро- или паровой турбины). Подобная свобода выбора позволяет оптимизировать генераторную установку в целом, не оглядываясь на частоту вращения ротора и тип электрической машины. Известно, что массогабаритные показатели электрической машины напрямую зависят от частоты вращения ротора [23]. Естественно, что чем больше частота вращения, тем меньше масса машины при той же мощности. Увеличение частоты ротора также оказывает положительное влияние на ядерную энергетическую установку с паротурбинным циклом. При увеличении частоты вращения в 2,3 раза и повышении параметров термодинамического цикла возможно снижение массы паропроизводящей установки и паротурбинной установки соответственно до 77 и 72 % [24].

КРИВЫЕ МОЩНОСТИ И ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ПРИ САМОВОЗБУЖДЕНИИ И НАБРОСЕ НАГРУЗКИ

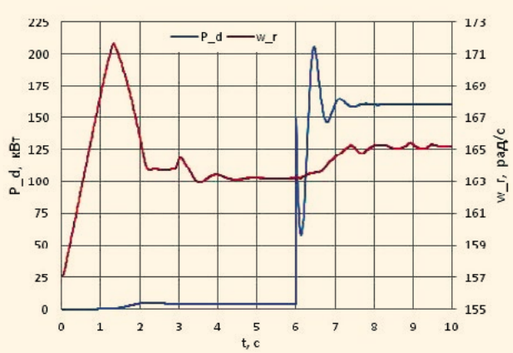


Рис. 7

Одной из устойчивых к повышению частоты вращения машин является асинхронная машина с короткозамкнутым ротором [25]. Кроме того, вентильный генератор на основе асинхронной машины — идеальный вариант с точки зрения снижения пульсации выпрямленного напряжения, поскольку короткозамк-нутый ротор имеет отличные демпфирующие свойства [26]. Для оценки перспектив использования в автономной энергосистеме постоянного тока асинхронного вентильного генератора с конденсаторным самовозбуждением были разработаны модели и проведены исследования, результаты которых затем обсудили на конференциях [27, 28].

Для исследования более сложной автономной энергосистемы постоянного тока, состоящей из дизельного двигателя, асинхронного вентильного генератора, повышающего конвертора, линии электропередачи, понижающего конвертора и нагрузки была разработана модель, представленная на рис. 4.

Модель состоит из стандартных блоков библиотек расширений Simulink и SimPowerSystems системы MATLAB, поэтому их корректность и результаты моделирования не вызывают сомнений [29–31]. С учетом того что для асинхронной машины, работающей в генераторном режиме, не принципиален пусковой момент, сопротивление ротора стандартного двигателя мощностью 160 кВт было уменьшено в два раза. Это осуществимо при неизменных габаритах путем замены короткозамкнутой алюминиевой обмотки ротора на короткозамкнутую медную обмотку. В результате, естественно, уменьшилось номинальное скольжение генератора, что благоприятно сказалось на жесткости его внешней характеристики при его работе с конденсаторным самовозбуждением. Основные недостатки

асинхронного генератора, которые связаны с трудностями стабилизации амплитуды и частоты его ЭДС, в вентильном генераторе не столь критичны. Частота вращения ротора, а следовательно, и частота ЭДС, может быть любой, но не превышающей критических значений прочности. В связи с этим стабилизацию напряжения можно осуществлять путем изменения частоты вращения ротора, что и реализовано в данной модели с использованием отрицательной обратной связи по напряжению, которое снимается с выхода вентильного генератора, т. е. с конденсатора C_d.

В подсистемах DC/DC Convertor этой модели для стабилизации напряжения тоже используется отрицательная обратная связь по напряжению (рис. 5).

На выходе блока PWM IGBT Inverter, т. е. инвертора с широтно-импульсной модуляцией на основе IGBT транзисторов, генерируется трехфазное напряжение частотой 1 кГц. При этом несущая частота равна 20 кГц. Дальнейшее увеличение основной частоты привело к некорректной работе инвертора.

Результаты моделирования переходных процессов при конденсаторном самовозбуждении асинхронного вентильного генератора с последующим набросом номинальной нагрузки, подключенной к понижающему конвертору (DC/DC), представлены на рис. 6 и 7.

Следует отметить, что для ускорения процесса самовозбуждения генератора в качестве стартера (положительного возмущения) в блоках конденсаторов модели задавалось остаточное (начальное) напряжение величиной 90 В. Кроме того, и скорость вращения ротора задавалась равной 157 рад/с. В противном случае процесс затягивался, но в итоге при достижении установившегося режима приводил к идентичным результатам, что и ускоренный процесс. На завершающем участке самовозбуждения (см. рис. 6) наблюдается перерегулирование напряжения, которое равно
(252 – 230)/230 · 100 % = 9,6 %.
При набросе нагрузки провал напряжения составил
(230 – 134)/ 230 · 100 % = 41,7 %,
а изменение напряжения —
(230 · 223,5)/230 · 100 % = 2,8 %.
Последнее свидетельствует о приемлемой стабилизации напряжения. При этом ток до наброса нагрузки не равен нулю. Последнее связано с тем, что инверторы данной модели начинают устойчиво работать при некотором минимальном значении тока. Номинальный ток в установившемся режиме составил 716 А. Напряжения повышающего и понижающего конверторов были выбраны произвольно. Они могут быть изменены на любые другие значения, как и все остальные параметры модели.

На рис. 7 представлены кривые мощности нагрузки и частоты вращения ротора генератора. При самовозбуждении перерегулирование частоты вращения ротора составляет
(171,6 – 163,2)/163,2 · 100 % = 5,1 %.
При набросе нагрузки скорость под действием обратной отрицательной связи по напряжению возрастает на (165,2 – 163,2)/
163,2 · 100 % = 1,2 %. В установившемся режиме мощность составила 160 кВт. Таким образом, представленные результаты свидетельствуют о работоспособности данной модели автономной электроэнергетической системы постоянного тока на основе асинхронного вентильного генератора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инверторная революция в электроэнергетике и электротехнике, связанная с появлением биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), привела к их широкому внедрению в высоковольтных системах постоянного тока (UHVDC и HVDC), а также в системах постоянного тока низкого напряжения.

В электроэнергетике наблюдаются встречные тенденции. С одной стороны, HVDC-технологии начинают использоваться на более низких ступенях напряжений, с другой — рост числа и мощности явных и скрытых потребителей постоянного тока, включая электромобили, бытовые устройства, электроприводы, освещение, а также основные элементы распределенной энергетики, неотвратимо подталкивают к закономерному переводу сетей низкого и среднего напряжений на «рельсы» постоянного тока, причем с повышением напряжения как первых, так и вторых сетей.

Несомненным известным положительным фактором перехода на постоянный ток является уменьшение затрат на сооружение воздушных и кабельных линий, уменьшение потерь мощности и увеличение пропускной способности.

Переход электроэнергетических систем всех уровней на постоянный ток открывает путь к созданию трансконтинентальных систем, а в конечном счете, и глобальной электроэнергетической системы.

Перевод электроэнергетики на постоянный ток позволит снять ограничения по частоте вращения генератора и турбины. Это, в свою очередь, открывает перспективы для проведения исследований, проектирования и создания генерирующих установок нового поколения с улучшенными массогабаритными и энергетическими характеристиками, что неминуемо даст экономический эффект.

Определенную нишу в генерирующих системах постоянного тока могут занять асинхронные вентильные генераторы с повышенной частотой вращения ротора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20–38–90127).

ЛИТЕРАТУРА

1. Changji-Guquan ±1,100 kV UHV DC Transmission Project Starts Power Transmission. URL: http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc_main_en/col2017112406/2019-01/18/20190118183221870335071_1.shtml
2. Рыжов Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов. 2-е изд. М.: Изд. дом МЭИ, 2007.
3. Зотин О.Т. В преддверии возрождения постоянного тока. DC Rematch Upcoming//Энергосовет. 2013. № 1. URL: http://www.energosovet.ru/bul_stat.php?idd=366
4. Беспалов В.Я. Котеленец Н.Ф. Электрические машины. М.: Изд. центр «Академия», 2013.
5. Сухие трансформаторы. Характеристики. URL: https://forca.ru/spravka/transformatory/tesar-suhie-transformatory-8.html
6. Лебедев А.В. Транзисторные источники питания для электродуговой сварки (обзор)//Автоматическая сварка. 2012. № 9. С. 34–40.
7. Dragan J. Boon Teck Ooi Developing DC Transmission Networks Using DC Transformers//IEEE Transactions on Power Delivery. 2010 October. Vol. 25. N 4. P. 2535–2543.
8. Kolar J.W., Huber J.E. Solid-State Transformers (SST) Concepts, Challenges and Opportunities. URL: https://www.pes-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/workshop_publications/__ECPE_SST_Workshop_2016_SST_Concepts_Challenges_Opportunities_FINAL_JWK_270116.pdf
9. Huber J.E., Kolar J.W. Thus SSTs are envisioned as key components of a smart grid//IEEE Transactions on Smart Grid. 2019 Jan. Vol. 10. I. 1.
10. Dan Wang, Yun Yang, Jie Tian, Chengxiong Mao, Junfeng Zhang. Design and Implementation of 10-kV MW-level Electronic Power Transformer (EPT)// IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS). 23–27 Sept. 2018. Portland, OR, USA.
11. Rouzbehi K., Miranian A., Luna A., Rodriguez P. Towards fully controllable multi-terminal DC grids using flexible DC transmission systems//2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE).
12. Sonawale S.A., Joshi P.M. Design of laboratory model for demonstration of solid state transformer for smart grid applica tions//2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES).
13. Kolar J.W. Solid State Transformer (SST) Applications. A Glimpse Into the Future. Nov. 19, 2019. URL: https://www.pes-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/workshop_publications/
14. Allee G., Tschudi W. Edison Redux: 380 V DC Brings Reliability and Efficiency to Sustainable Data Centers//IEEE Power and Energy Magazine. 2012. Vol. 10. N 6. P. 50–59.
15. EMerge Alliance. An open industry association. Leader in promoting the greater use of direct current in DC and hybrid AC/DC power systems. URL: https://www.emergealliance.org/standards/data-telecom/standard-faqs/
16. Павленко В., Климов В., Климов И. Сравнительный анализ электромагнитных процессов в структурах электроприводов нефтедобывающей промышленности//Силовая электроника. 2010. № 26. С. 30–35.
17. Европе предложили полностью отказаться от двигателей внутреннего сгорания с 2030 года. URL: https://nplus1.ru/news/2016/10/10/ban-ice
18. В Нидерландах готовят законопроект о полном переходе на электромобили к 2025 году. URL: http://elektrovesti.net/45581_v-niderlandakh-gotovyat-zakonoproekt-o-polnom-perekhode-na-elektromobili-k-2025-godu
19. Обзор квадрокоптеров для перевозки людей. Ehang 184 [Electronic resource]. 2020. URL: https://nanojam.ru/news/obzor-kvadrokoptera-dlya-vzroslyh-ehang-184
20. В Новой Зеландии испытывают беспилотное воздушное такси [Electronic resource]. 2020. URL: https://www.popmech.ru/technologies/news-414932-v-novoy-zelandii-ispytyvayut-bespilotnoe-vozdushnoe-taksi/
21. Аэротакси: кто разрабатывает пассажирские коптеры [Electronic resource]. 2020. URL: https://vc.ru/future/79608-aerotaksi-kto-razrabatyvaet-passazhirskie-koptery
22. Суслова О. Обобщение тенденций развития и применения технологий передачи электроэнергии постоянным током и силовой электроники для энергосистем (по итогам 47-й сессии СИГРЭ, 2018 г.). URL: http://cigre.ru/47/pdf/B4 %20 %D0 %9D %D0 %98 %D0 %9A_ %D0 %924_ %D0 %A1 %D1 %83 %D1 %81 %D0 %BB %D0 %BE %D0 %B2 %D0 %B0.pdf
23. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебник для бакалавров. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2017.
24. Долгов В.Н. Перспективы улучшения массогабаритных и виброшумовых показателей ЯЭУ с паротурбинным циклом//Атомная энергия. 1990. Т. 69. Вып. 6. С. 370–373.
25. Торопцев Н.Д. Асинхронные генераторы автономных систем. М.: Знак, 1998.
26. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. М.: Высшая школа, 1982.
27. Джендубаев Э.А.-З., Джендубаев А.-З.Р. Постоянный ток как основа электроэнергетики будущего//Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конференции, 2–6 октября 2017, Самара. В 3 т. Т 1. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. С. 436.
28. Кононов Ю.Г., Джендубаев Э.А.-З., Джендубаев А.-З.Р. Исследование перспектив применения постоянного тока в электроэнергетике. Материалы VI-й ежегодной научно-практической конференции преподавателей, студентов и молодых ученых Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука — региону», г. Ставрополь, 2–27 апреля 2018 г.
29. URL: https://www.mathworks.com/products/matlab.html
30. Дьяконов В.П. Simulink. Самоучитель. М.: ДМК-Пресс, 2015.
31. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. Саратов: Профобразование, 2017.

ПАМЯТИ В.Е. ФОРТОВА

Фото: Сергей Гунеев/РИА Новости

29 ноября 2020 г. остановилось сердце выдающегося ученого и государственного деятеля, президента РАН с 2013 по 2017 гг., академика Владимира Евгеньевича Фортова.

Владимир Евгеньевич Фортов родился 23 января 1946 г. в г. Ногинске Московской области. В 1962 г. окончил среднюю школу с серебряной медалью. Затем поступил в Московский физико-технический институт на факультет аэрофизики и прикладной математики, который окончил с отличием в 1968 г. по специальности «Термодинамика и аэродинамика». В 1971 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Теплофизика плазмы ядерных ракетных двигателей», позже защитил докторскую диссертацию на тему «Исследование неидеальной плазмы динамическими методами», стал доктором физико-математических наук. Автор более 500 опубликованных научных работ и 30 монографий, переведенных на иностранные языки. Основные научные работы В.Е. Фортова связаны с исследованием плазмы и физики экстремальных состояний вещества.

С 1971 по 1986 г. работал в Институте химической физики АН СССР, а затем по приглашению академика А.Е. Шейндлина перешел в Объединенный институт высоких температур АН СССР, директором которого стал в 2007 г. В 1987 г. был избран членом-корреспондентом АН СССР, в 1991 г. стал академиком (отделение физико-технических проблем энергетики РАН). С августа 1996 г. — зампред правительства РФ, председатель Госкомитета по науке и технологиям, с марта 1997 г. — министр науки и технологий РФ. 29 мая 2013 г. общим собранием Российской академии наук был избран президентом академии.

Владимир Евгеньевич был превосходным спортсменом, мастером спорта по баскетболу и парусному спорту, кандидатом в мастера спорта по шахматам. Под парусами на яхте прошел мыс Доброй Надежды и мыс Горн. В составе международных научных экспедиций достиг Северного и Южного полюсов, погружался на глубоководном аппарате «Мир» на дно озера Байкал.

В.Е. Фортов был многолетним членом физтеховской команды КВН.

Из интервью В.Е. Фортова «Российской газете» 21.12.2005:

«Лицо любого века, и прежде всего его экономики, определяет как раз энергетика. Именно переход с пара на электричество в начале XX века и, конечно, та самая "плюс электрификация" обеспечили невиданный прогресс цивилизации. Неслучайно самым выдающимся событием прошлого века Академия наук США назвала именно электрификацию. Есть закон, который гласит: ВВП страны жестко связан со средним количеством энергии, приходящимся на одного человека. Неслучайно на страны "золотого миллиарда", где проживает пятая часть землян, приходится 80 % производимой на Земле энергии. В этих странах, да и в нашей тоже, душевое потребление энергии вплоть до конца прошлого века удваивалось каждые 40 лет, достигнув, например, в Канаде 405 ГДж, США 327, Европе в среднем 132. И только в последнее время рост замедлился.

Уже всем ясно: если весь мир будет стремиться к западным стандартам при нынешнем уровне развития энергетики, это приведет к большим проблемам. Энергетическая безопасность мира окажется под угрозой. Необходимо искать новые, более эффективные источники энергии, а главное, потреблять ее намного экономичнее. И здесь слово за наукой, причем самой что ни на есть фундаментальной».

Наша редакция, как и вся общественность электротехнической отрасли, скорбит о потере выдающегося ученого и гражданина академика В.Е. Фортова.