



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 621.039

ИНТЕГРАЦИЯ CES С АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ (АЭС)

¹ Борисов И.С., ² Королевская А.С., ³Нацубидзе С.В.

ФГБОУ ВО «ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ» УНИВЕРСИТЕТ, Иркутск, Россия (664074, Иркутская область, город Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83), e-mail: ¹myr3una@gmail.com, ²anelok_03@mail.ru, ³natsubidze00@bk.ru

Было предпринято значительное количество усилий, чтобы справиться со смещением нагрузки на АЭС, а общепринятым методом является использование гидроаккумулирующих накопителей энергии. В последние десятилетия были разработаны новые подходы к использованию избыточной электроэнергии для поддержания АЭС почти на полной нагрузке. Когда АЭС работают с частичной нагрузкой, стоимость производства электроэнергии становится высокой. Кроме того, частые изменения нагрузки могут привести к быстрому старению оборудования и повлиять на производительность установки, что приводит как к экономическим проблемам, так и к проблемам, связанным с безопасностью. Интеграция CES с АЭС может решить проблемы, связанные с регулированием нагрузки АЭС более экономичным и эффективным способом.

Ключевые слова: Возобновляемая энергия, криогенная энергетика, накопители энергии, электроэнергетика, атомная электростанция.

INTEGRATION OF CES WITH NUCLEAR POWER PLANTS (NPP)

¹Borisov I.S., ²Korolevskaya A. S., ³Natsubidze S.V.

IRKUTSK NATIONAL RESEARCH TECHNICAL UNIVERSITY, Irkutsk, Russia (83 Lermontova st., Irkutsk, Irkutsk 664074, Irkutsk region), e-mail: ¹myr3una@gmail.com, ²anelok_03@mail.ru, ³natsubidze00@bk.ru

A significant amount of effort has been made to cope with the shift in load at nuclear power plants, and the generally accepted method is the use of pumped storage energy storage. In recent decades, new approaches have been developed to use excess electricity to maintain nuclear power plants at almost full load. When nuclear power plants operate with partial load, the cost of electricity production becomes high. In addition, frequent load changes can lead to rapid aging of the equipment and affect the performance of the installation, which leads to both economic and safety problems. The integration of CES with nuclear power plants can solve the problems associated with regulating the load of nuclear power plants in a more economical and efficient way.

Keywords: Renewable energy, cryogenic energy, energy storage, electric power industry, nuclear power plant.

Введение

В настоящее время на АЭС с водо-водяным ядерным реактором приходится значительная часть мировых АЭС [1-3]. Помимо проблем безопасности и сокращения срока службы, этот режим работы также сталкивается с двумя проблемами при отслеживании нагрузки. Во-первых, это ограниченный градиент изменения мощности, который обычно занимает несколько часов для достижения примерно половины нагрузки. Во-вторых,

снижение регулирования АЭС только уравнивает выработку и спрос в течение нескольких часов, в то время как другие установки, такие как газовые электростанции, должны быть задействованы для удовлетворения пиковых потребностей.

1. Оценка производительности

На Рисунке 1 показана технологическая схема типичной установки CES, которая состоит из трех отличительных, но взаимосвязанных и интегрированных подсистем: установки сжижения воздуха, блока хранения и блока рекуперации энергии. Во время зарядки воздух из окружающей среды сжимается посредством серии процессов сжатия и расширения, основанных на модифицированном цикле Клода.

Процесс сжатия (потoki 1-5) оснащен двумя промежуточными охладителями, через которые накапливается тепло при сжатии. Здесь, в качестве примера рассматривается накопление тепла при сжатии в диатермическом масле. Такое масло действует как теплоноситель в промежуточных охладителях, так и как накопительная среда в резервуарах для хранения горячей воды (потoki 1-5). Воздух высокого давления после последней стадии сжатия, охлажденный соответствующим промежуточным охладителем, дополнительно охлаждается в холодильной камере (потoki 5-6) холодным воздухом (потoki 14-15) из газожидкостного сепаратора и холодным воздухом (потoki 3C-4C) из холодильной камеры высокой степени (HGSC). Два воздушных потока 10 и 12 в холодильной камере расширяются в двух турбодетандерах для повышения эффективности процесса охлаждения. Наконец, охлажденный воздух в холодильной камере расширяется в криодетандере, образуя смесь газообразного и жидкого воздуха. Смесь разделяется в сепараторе с жидким воздухом, хранящимся в криогенном баке при температуре около -193°C и давлении, близком к давлению окружающей среды.

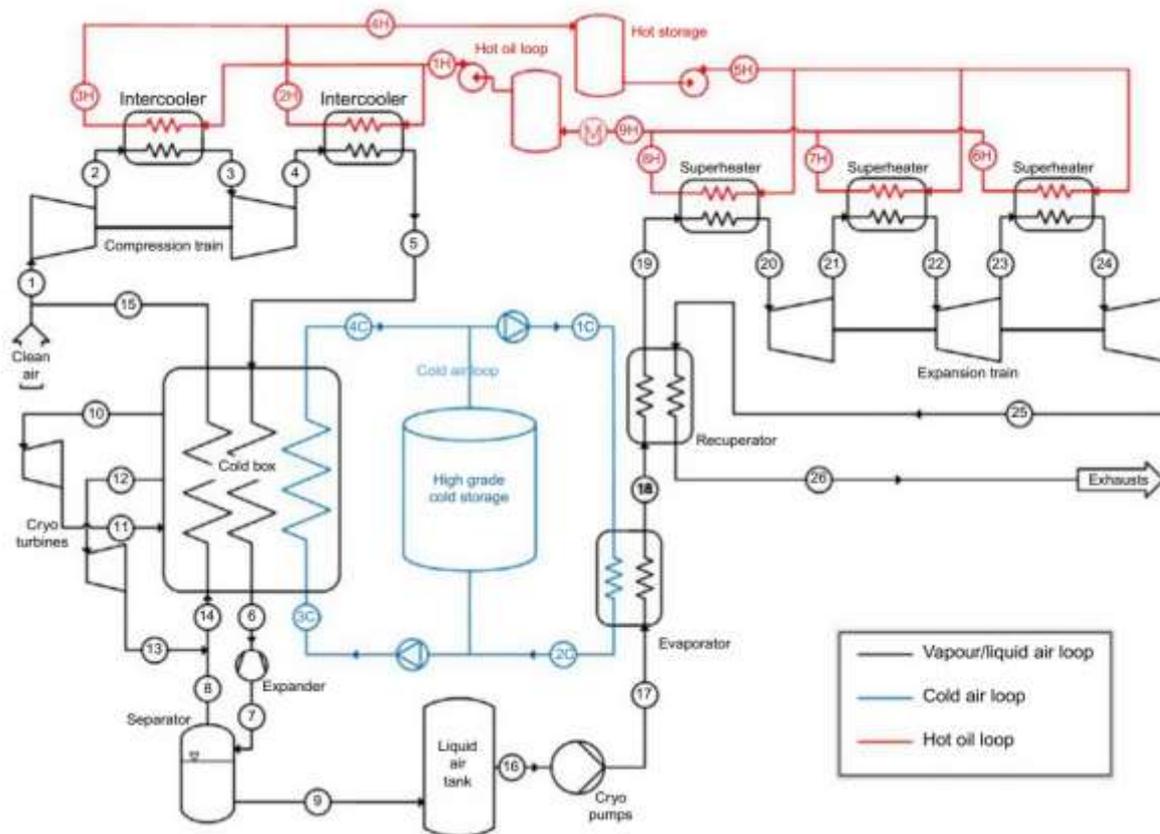


Рисунок 1 – Принципиальная схема предлагаемого криогенного накопителя энергии, основанная на сжижении природного газа

Во время разрядки, накопленный жидкий воздух сначала нагнетается криогенными насосами, а затем повторно нагревается с использованием тепла окружающей среды и тепла сжатия. Воздух нагревается в секции теплообменников, включающих: испаритель, рекуператор и пароперегреватель. Холодная энергия, выделяющаяся при испарении жидкого воздуха (потoki 17-18), улавливается встречным потоком теплоносителя (потoki 1C-2C) и накапливается в HGSC [6, 7]. HGSC могут быть реализованы с использованием таких технологий как уплотненные слои горных пород, как рассматривается здесь, и эксплуатироваться при давлении, близком к атмосферному, для снижения затрат и повышения безопасности HGSC. Наконец, нагретый воздух высокого давления расширяется в многоступенчатых турбинах для выработки электроэнергии (потoki 20-25).

Ключевым термодинамическим показателем эффективности для оценки установки CES является так называемый коэффициент эффективности полезного действия в обе стороны, который определяет как отношение производительности в процессе выделения энергии к потребляемой мощности в процессе накопления энергии.

CES – это комбинированная технология накопления энергии на основе термодинамики, которая, вероятно, подойдет для применений с мощностью от десятков до сотен МВт и производительностью от десятков МВт·ч до нескольких ГВт·ч.

Основные преимущества этой технологии — легкость масштабирования и возможность более длительного, чем в традиционных аккумуляторах, хранения электроэнергии. Благодаря этим особенностям установки могут сыграть важную роль в эффективном использовании энергии, получаемой из возобновляемых источников.

2. Стремление к интеграции CES с АЭС

АЭС отличаются высокими капитальными и низкими эксплуатационными расходами. Это означает, что затраты на электроэнергию от такой капиталоемкой технологии могут быть низкими при эксплуатации на полную мощность, и в результате АЭС в основном использовались для выработки электроэнергии с базовой нагрузкой. Однако с увеличением числа установок АЭС мощность выработки электроэнергии может превышать базовую нагрузку электросетей. Например, на долю атомной энергетики приходится 53% от общей установленной мощности Франции, при этом вырабатывается 79% электроэнергии в стране. Избыток электроэнергии в непиковое время приходится либо экспортировать в другие страны, либо хранить для последующего использования (временной сдвиг). Если эти две меры не смогут сбалансировать выработку и спрос, АЭС должны быть сокращены.

Когда АЭС работают с частичной нагрузкой, стоимость производства электроэнергии становится высокой. Кроме того, частые изменения нагрузки могут привести к быстрому старению оборудования и повлиять на производительность установки, что приводит как к экономическим проблемам, так и к проблемам, связанным с безопасностью.

В настоящее время на АЭС с водо-водяным ядерным реактором приходится значительная часть мировых АЭС. Помимо проблем безопасности и сокращения срока службы, этот режим работы также сталкивается с двумя проблемами при отслеживании нагрузки. Во-первых, это ограниченный градиент изменения мощности, который обычно занимает несколько часов для достижения примерно половины нагрузки. Во-вторых, снижение регулирования АЭС только уравнивает выработку и спрос в течение нескольких часов, в то время как другие установки, такие как газовые электростанции, должны быть задействованы для удовлетворения пиковых потребностей.

3. Интеграция CES с АЭС

Было предпринято значительное количество усилий, чтобы справиться со смещением нагрузки на АЭС, а общепринятым методом является использование гидроаккумулирующих накопителей энергии. В последние десятилетия были разработаны новые подходы к использованию избыточной электроэнергии для поддержания АЭС почти на полной нагрузке.

К ним относятся паровые аккумуляторы, крупномасштабное производство и хранение водорода и геотермальные накопители тепла.

Недавно была предложена интеграция CES с АЭС, которая потенциально может решить проблемы, связанные с регулированием нагрузки АЭС, более экономичным и эффективным способом. На рис. 6 показан принцип работы интегрированной системы, которая состоит из подсистемы АЭС и подсистемы CES [4, 5]. Подсистема АЭС в интегрированной системе аналогична обычной АЭС с водо-водяным ядерным реактором. Единственная разница заключается в том, что во вторичном контуре имеются два трехходовых клапана, которые позволяют рабочей жидкости подаваться либо в паровую турбину для выработки электроэнергии, либо в теплообменник 4 для перегрева воздуха высокого давления в подсистеме CES (Рисунок 2).

Подсистема CES состоит из блока сжижения воздуха в левой части и блока рекуперации энергии в правой нижней части Рисунок 2. Подсистема сжижения воздуха работает

аналогично простейшему сжижителю Linde-Hampson, за исключением использования внешней холодной энергии через теплообменник 6.

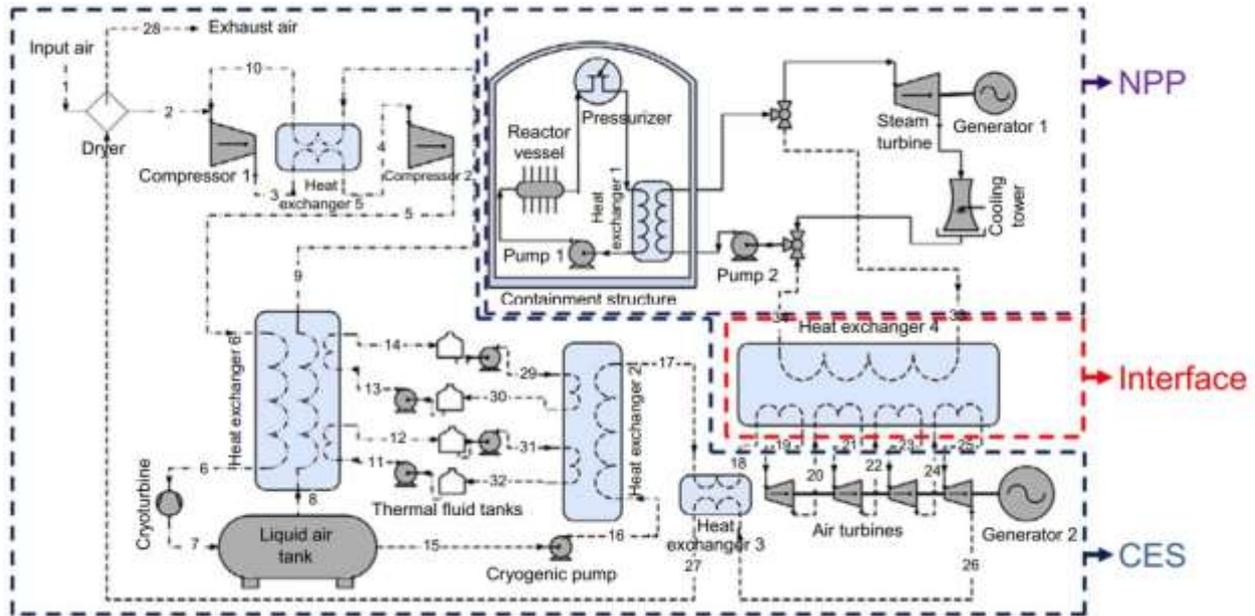


Рисунок 2 – Интегрированная технология АЭС-CES

Подсистема CES состоит из блока сжижения воздуха в левой части и блока рекуперации энергии в правой нижней части рис. 6. Подсистема сжижения воздуха работает аналогично простейшему сжижителю Linde-Hampson, за исключением использования внешней холодной энергии через теплообменник 6.

Холодильное хранилище и связанная с ним функция рекуперации действуют как связующее звено между блоком сжижения воздуха и блоком рекуперации энергии.

В качестве хладоносителей при оценке используются пропан и метанол, которые также действуют как рабочие жидкости для теплопередачи. Обоснованием для рассмотрения этих двух сред хранения холода является то, что они хорошо соответствуют требуемому температурному диапазону и обладают высокой удельной теплоемкостью. Предложена конфигурация с двумя резервуарами для хранения и рекуперации энергии холода для каждой из двух жидкостей: на этапе холодного хранения две жидкости перекачиваются соответственно из теплых резервуаров в холодные резервуары (энергия холода сохраняется, в то время как мощность восстанавливается); на этапе восстановления холода две жидкости перекачиваются соответственно из теплых резервуаров в холодные резервуары, жидкости вытекают соответственно из холодных резервуаров в теплые резервуары (высвобождается холодная энергия, в то время как энергия накапливается). Дополнительные преимущества использования охлаждающих жидкостей, как для передачи, так и для хранения холодной энергии включают в себя большее упрощение конструкции системы без дополнительных теплообменников и более простую эксплуатацию, при которой количество холодной энергии и заданная температура легко регулируются путем регулирования расхода жидкостей.

Блок рекуперации энергии соединен с АЭС посредством нагрева теплообменника 4, в котором утилизируется низкосортное тепло от АЭС. Использование такого подхода позволяет преобразовывать тепловую энергию, обычно расходуемую в процессе охлаждения, в

электрическую энергию с высокой эффективностью, которая не может быть достигнута никакими другими технологиями хранения.

Теплообменник 4 обеспечивает связь между подсистемой CES и подсистемой АЭС. Такая интеграция позволяет активной зоне реактора и первичному контуру АЭС стабильно работать при полной нагрузке в любое время, в то время как чистая выходная мощность регулируется только подсистемой CES. Восстановление мощности в подсистеме CES аналогично процессу выработки электроэнергии с использованием газовой турбины, при этом может быть достигнута гораздо более высокая скорость изменения мощности по сравнению с обычным регулированием АЭС.

Заключение

Технология CES, интегрированная с АЭС, обеспечивает эффективное и действенное решение для переключения нагрузки станций. Термодинамический анализ интегрированной системы CES-АЭС при довольно общих исходных допущениях показывает, что эффективность накопления электроэнергии в обе стороны составляет около 71%, в то время как чистая выходная мощность в режиме выделения электроэнергии может в 2,7 раза превышать номинальную мощность АЭС. Эта особенность делает интеграцию технологии CES с АЭС высококонкурентным вариантом, который не может быть достигнута никакими другими технологиями хранения.

Список литературы

1. Р.Б. Скотт. Техника низких температур. Перевод под ред. проф. М.П. Малкова. М.: Изд. иностр. литер. , 1962, С. 21-22.
2. C. Bruynooghe, A. Eriksson, G. Fulli, Load-following operating mode at nuclear power plants (NPPs) and incidence on operation and maintenance (O&M) costs. Compatibility with wind power variability, European Commission, Joint Research Centre, Institute of Energy, 2010.
3. E.E. Michaelides, Nuclear Power Plants: Alternative Energy Sources, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 131–172.
4. M.V. Kothare, B. Mettler, M. Morari, P. Bendotti, C.M. Falinower, Level control in the steam generator of a nuclear power plant, IEEE Trans. Control Syst. Technol.
5. Быстрицкий Г. Ф. Основы энергетики. — М.: Инфра-М, 2007. — 276 с.
6. C. Coombs, French nuclear power: a model for the world? Hinckley J. Polit. 11 (2010) 7–13.
7. C.W. Forsberg, Y. Lee, M. Kulhanek, M.J. Driscoll, in: Gigawatt-year nuclear geothermal energy storage for light-water and high-temperature reactors, International Congress on the Advances in Nuclear Power Plants, Chicago, IL, 2012.

References

1. R.B. Scott. Low temperature technique. Translated by prof. M.P. Malkov. M.: Foreign Publishing House. lit., 1962, p. 21-22.
2. C. Bruynooghe, A. Eriksson, G. Fulli, Load-following operating mode at nuclear power plants (NPPs) and incidence on operation and maintenance (O&M) costs. Compatibility with wind power variability, European Commission, Joint Research Centre, Institute of Energy, 2010.
3. E.E. Michaelides, Nuclear Power Plants: Alternative Energy Sources, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 131–172.

4. M.V. Kothare, B. Mettler, M. Morari, P. Bendotti, C.M. Falinower, Level control in the steam generator of a nuclear power plant, IEEE Trans. Control Syst. Technol.
 5. Bystritsky G. F. Fundamentals of energy. — М.: Infra-M, 2007. — p.276
 6. C. Coombs, French nuclear power: a model for the world? Hinckley J. Polit. 11 (2010) 7–13.
 7. C.W. Forsberg, Y. Lee, M. Kulhanek, M.J. Driscoll, in: Gigawatt-year nucleargeothermal energy storage for light-water and high-temperature reactors, International Congress on the Advances in Nuclear Power Plants, Chicago, IL, 2012.
-