

УДК 536

ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Евтушенко А. А., Лихачев М.В. студенты гр. ЭПб-251, I курс

Научный руководитель: Мальшин А. А., к.т.н., доцент

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Электроэнергетическая система представляет собой сложную многоуровневую структуру, объединяющую процессы генерации, передачи, трансформации, распределения и потребления электрической энергии. На каждом из этих этапов возникают неизбежные потери активной мощности и энергии, обусловленные фундаментальными физическими законами, в первую очередь — законом Джоуля–Ленца, явлением гистерезиса, вихревых токов, а также конструктивными особенностями оборудования.

Снижение потерь электроэнергии является одной из ключевых задач современной энергетики. В масштабах страны даже снижение потерь на 1 % позволяет сэкономить миллиарды киловатт-часов, что напрямую влияет на экономическую эффективность, экологическую нагрузку и надежность энергоснабжения. Комплексный анализ потерь позволяет выявить основные резервы повышения эффективности работы энергосистемы и обосновать целесообразность внедрения энергоэффективных технологий.

В настоящей работе представлен анализ потерь электрической энергии на всех этапах функционирования системы электроснабжения (СЭС): от стадии генерации до конечного бытового потребления. Рассмотрены физические механизмы возникновения потерь, их количественные характеристики, выполнены оценочные расчёты для типовых элементов сети.

Рассмотрим потери, начиная с производства электроэнергии – это нагрев проводников, механические потери, магнитные потери.

Электрические потери в обмотках статора и ротора генератора обусловлены джоулевым нагревом проводников при протекании тока нагрузки. Величина этих потерь определяется законом Джоуля–Ленца, для трех фаз:

$$\Delta P_{эл} = 3I^2 R,$$

где I – ток фазы, А; R – активное сопротивление обмотки фазы, Ом.

Например для генератора мощностью 100 МВт с номинальным током 3500 А и сопротивлением обмотки статора 0,005 Ом (Для медных обмоток при температуре 75 °С удельное сопротивление составляет $\rho=0,0217$ Ом·мм²/м) потери будут равны 184кВт или 0,18%.

Механические потери возникают из-за трения в подшипниках, аэродинамического сопротивления вращению ротора, затрат энергии на работу вен-

тиляторов и систем охлаждения. Механические потери практически не зависят от нагрузки и определяются конструкцией машины и частотой вращения. Для турбогенераторов они могут составлять 0,1–0,5 % от номинальной мощности. Для гидрогенераторов с низкой частотой вращения механические потери ниже.

Магнитные потери в стали статора и ротора возникают вследствие перемагничивания ферромагнитного материала (гистерезиса, вихревых токов (токов Фуко)).

Современные электротехнические стали с изолированными листами позволяют снизить потери на вихревые токи в 3–5 раз по сравнению с традиционными материалами.

Все виды потерь в генераторе преобразуются в тепло, что требует эффективных систем охлаждения: воздушного, водородного или водяного. Эффективность охлаждения напрямую влияет на допустимую нагрузку и срок службы изоляции. Повышение температуры на каждые 10 °С сверх номинальной сокращает срок службы изоляции вдвое (правило Монтзингера).

Передача электроэнергии по воздушным и кабельным линиям сопровождается потерями активной мощности, обусловленными нагревом проводников, а также потерями на корону (для ВЛ 110 кВ и выше) и диэлектрическими потерями в кабелях.

Основное выражение для потерь в трёхфазной линии:

$$\Delta P_{эл} = 3I^2 R_{л} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_{л},$$

где P, Q – активная и реактивная мощности, передаваемые по линии; U – линейное напряжение; $R_{л}$ – активное сопротивление линии.

Таблица 1

Основные факторы потерь

Фактор	Влияние
Сопротивление проводника	Прямо пропорционально удельному сопротивлению и длине, обратно пропорционально сечению
Величина тока	Потери пропорциональны квадрату тока
Длина линии	С увеличением длины потери растут линейно
Климатические условия	Влияют на температуру проводника (сопротивление) и потери на корону
Коэффициент мощности	Низкий $\cos\varphi$ увеличивает ток при той же активной мощности

Основными методами снижения потерь являются в соответствии с таблицей 1:

1. Повышение напряжения – снижает ток при той же передаваемой мощности в k раз, потери – в k^2 раз.
2. Применение современных проводников – использование проводов с сердечником из композитных материалов позволяет уменьшить провисание и увеличить пропускную способность.
3. Оптимизация режимов работы – выравнивание нагрузок по фазам, отключение линий при малых нагрузках.
4. Применение устройств компенсации реактивной мощности – повышает $\cos\varphi$.

Например, для линии 110 кВ длиной 100 км, провод АС-185/29 ($R_0=0,162$ Ом/км), передаваемая мощность $P=30$ МВт, $\cos\varphi=0,85$, ток $I=185$ А, сопротивление линии $R_{\text{л}}=16,2$ Ом, потери составят 1,66 МВт или 5,5%. При повышении напряжения до 220 кВ ток снизится до 92,5 А, а потери — до 0,42 МВт, т.е. потери уменьшатся в 4 раза.

Потери в трансформаторах типа ТМГ (трансформаторы масляные герметизированные нового поколения) представлены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнительная таблица потерь для трансформаторов ТМГ

Мощность, кВт	Потери ХХ, Вт	Потери КЗ, Вт	КПД при 100% нагрузки
100 (ТМГ)	320	1 970	97,7 %
250 (ТМГ)	650	3 700	98,3 %
400 (ТМГ)	930	5 400	98,4 %
630 (ТМГ)	1 250	7 600	98,6 %

Потери в обмотках (нагрузочные) пропорциональны квадрату тока нагрузки:

$$\Delta P_{\text{об}} = I^2 R_{\text{тр}}$$

В трёхфазном трансформаторе:

$$\Delta P_{\text{об}} = 3I_{\phi}^2 R_{\phi}$$

Магнитные потери в стали (потери холостого хода) включают потери на гистерезис и вихревые токи.

Они практически не зависят от нагрузки и определяются качеством электротехнической стали, толщиной листов и конструкцией магнитопровода.

Для современных трансформаторов потери холостого хода снижены на 30–50 % по сравнению с трансформаторами 1970–80-х годов за счёт применения холоднокатаной текстурованной стали с аморфной структурой.

Потери в распределительных сетях 0,4–10 кВ подразделяются на:

- Технические — физически обусловленные нагревом проводов, трансформаторов, кабелей;
- Коммерческие — связанные с хищениями, погрешностями учёта, небалансами.

В российских сетях средний уровень потерь составляет 8–12 %, из которых до 30–40 % приходится на коммерческую составляющую.

Перегрузки приводят к квадратичному росту потерь и ускоренному старению изоляции. Несимметрия нагрузок вызывает потери в нулевом проводе и дополнительный нагрев трансформаторов.

С увеличением срока службы растут переходные сопротивления в контактах, ухудшается изоляция, появляются токи утечки. Это приводит к дополнительным потерям и снижению надёжности.

Коммерческие потери требуют внедрения систем автоматизированного учёта (АСКУЭ), которые позволяют снизить их на 15–25 % за счёт оперативного контроля и выявления небалансов.

Пути снижения потерь:

- Повышение напряжения и оптимизация уровней. Перевод сетей 6 кВ на 10 кВ, а 10 кВ на 20 кВ позволяет снизить токи и потери. Для магистральных сетей строительство ВЛ 330–750 кВ экономически оправдано при больших перетоках мощности.
- Совершенствование материалов

Таблица 3

Совершенствование материалов

Элемент сети	Традиционный материал	Современный материал	Снижение потерь
Провода ВЛ	Алюминий (АС)	Алюминиевые сплавы, композит	10–20 %
Кабели	Бумажная изоляция	Сшитый полиэтилен (XLPE)	5–15 %
Трансформаторы	Обычная сталь	Аморфная сталь	30–50 % (XX)

- Балансировка нагрузок. Выравнивание нагрузок по фазам в сетях 0,4 кВ снижает потери в нейтрали и улучшает качество напряжения. Эффект

достигается за счёт перераспределения потребителей и применения симметрирующих устройств.

- Внедрение энергоэффективных устройств. Частотно-регулируемые приводы снижают потери в электродвигателях. Светодиодное освещение снижает нагрузку на сети освещения. Компенсация реактивной мощности на стороне 0,4 кВ уменьшает токи и потери.

- Комплексный экономический эффект. Применение системного подхода к снижению потерь позволяет сократить суммарные потери на 15–25 % при сроках окупаемости инвестиций 3–7 лет в зависимости от масштаба и применяемых технологий.

Исходя из данных представленных выше можно сделать следующие выводы:

Потери электроэнергии имеют комплексную природу и возникают на всех этапах функционирования системы электроснабжения — от генерации до бытового потребителя.

Проведённый анализ показывает, что наибольший вклад в суммарные потери вносят электрические потери в линиях электропередачи (до 40 %), потери в трансформаторах (до 30 %), коммерческие потери в распределительных сетях (до 40 % в некоторых регионах).

Снижение потерь требует системного подхода, включающего модернизацию оборудования с заменой на более энергоэффективное, оптимизацию режимов работы сетей, внедрение систем учёта и контроля, повышение культуры эксплуатации.

Оптимизация всех элементов системы электроснабжения позволяет не только повысить её экономическую эффективность, но и улучшить качество и надёжность электроснабжения потребителей, что является приоритетной задачей развития энергетики.

Список литературы

1. Правила устройства электроустановок. — М.: Энергоатомиздат, 2023.
2. ГОСТ Р 52719–2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
3. ГОСТ 31996–2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией.
4. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника: учебник для вузов. — М.: Академия, 2010.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. — М.: Гардарики, 2007.
6. Новиков П.Н. Электроснабжение промышленных предприятий. — М.: Энергия, 2012.
7. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. — М.: Энергоатомиздат, 2009.

8. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.