ISNN 3030-3907

2026
JUNE
ISSUE - 6
VOLUME -6

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

IYUN 2026
Issue - 6, VOLUME – 6

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЛИНИЯХ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА (HVDC)

Турсунов Дониёр Абдусалимович
E-mail: doniyortakaha@gmail.com
Исмоилов Фазлиддин Жамолиддин угли
Ферганский государственный технический университет
E-mail: ismoilovfazliddin378@gmail.com

Аннотация. В данной работе рассматривается передача электрической энергии на большие расстояния с использованием линий высокого напряжения постоянного тока (HVDC). Представлено сравнение систем передачи переменного тока (HVAC) и постоянного тока (HVDC), демонстрирующее экономические преимущества технологии HVDC при передаче энергии на дальние расстояния. Приведена упрощённая модель оценки потерь в преобразователях, потерь энергии в линии и общей экономической эффективности. Выполнены пошаговые расчёты для передачи мощности 1000 МВт на расстояние 1000 км с использованием линии HVDC 500 кВ и линии HVAC 500 кВ.

Ключевые слова: высоковольтный постоянный ток, передача HVDC, передача мощности, потери преобразователей, энергетические потери, экономическая эффективность, передача на большие расстояния.

Annotatsiya. Ushbu ishda elektr energiyasini uzoq masofalarga yuqori kuchlanishli o‘zgarmas tok (HVDC) uzatish liniyalari yordamida uzatish masalasi ko‘rib chiqilgan. O‘zgaruvchan tok (HVAC) va o‘zgarmas tok (HVDC) uzatish tizimlari taqqoslanib, energiyani uzoq masofalarga uzatishda HVDC texnologiyasining iqtisodiy afzalliklari yoritilgan. O‘zgartirgichlardagi yo‘qotishlar, uzatish liniyasidagi energiya yo‘qotishlari hamda umumiy iqtisodiy samaradorlikni baholash uchun soddalashtirilgan model keltirilgan. 500 kV kuchlanishli HVDC va 500 kV kuchlanishli HVAC liniyalari orqali 1000 MVt quvvatni 1000 km masofaga uzatish bo‘yicha bosqichma-bosqich hisob-kitoblar bajarilgan.

Kalit so‘zlar: yuqori kuchlanishli o‘zgarmas tok, HVDC uzatish, quvvat uzatish, o‘zgartirgich yo‘qotishlari, energiya yo‘qotishlari, iqtisodiy samaradorlik, uzoq masofalarga energiya uzatish.

Abstract. This paper examines the transmission of electrical energy over long distances using High-Voltage Direct Current (HVDC) transmission lines. A comparison between High-Voltage Alternating Current (HVAC) and High-Voltage Direct Current (HVDC) transmission systems is presented, highlighting the economic advantages of HVDC technology for long-distance power transmission.

ISSN 3030-3907

A simplified model is developed to evaluate converter losses, transmission line energy losses, and overall economic efficiency. Step-by-step calculations are performed for transmitting 1000 MW of power over a distance of 1000 km using a 500 kV HVDC line and a 500 kV HVAC line.

Keywords: High-Voltage Direct Current, HVDC transmission, power transmission, converter losses, energy losses, economic efficiency, long-distance power transmission.

ВВЕДЕНИЕ.

Надёжная и экономически эффективная передача электроэнергии на большие расстояния является одной из наиболее актуальных задач энергетических систем. Наряду с традиционно широко применяемыми линиями переменного тока (AC) в последние годы всё большее значение приобретают линии высоковольтного постоянного тока (HVDC). Технология HVDC обладает рядом преимуществ в процессе передачи электроэнергии: в особенности она отличается снижением потерь мощности на больших расстояниях, уменьшением затрат на строительство линии и возможностью объединения энергосистем разных частот. Ещё один важный аспект систем передачи постоянного тока — отсутствие потерь реактивной мощности, что особенно обеспечивает высокую эффективность при кабельной передаче. Кроме того, линии HVDC широко применяются в подводных кабелях, для подключения отдалённых районов к центральным энергосистемам, а также для обеспечения стабильного обмена между несинхронизированными (50/60 Гц) или нестабильными энергосистемами. Развитие технологий HVDC непосредственно связано с появлением мощных полупроводниковых устройств (тиристоров, транзисторов IGBT). Эти устройства позволили передавать энергию в форме постоянного тока на большие расстояния с малыми потерями и создали условия для широкого применения на крупных магистральных линиях. Расширение сети линий HVDC во многих странах мира — в частности в Китае, Индии, Бразилии, России и европейских странах — свидетельствует о высоких перспективах данной технологии. Сегодня сотни линий HVDC, особенно на напряжениях ±600 кВ, ±800 кВ и выше, вносят важный вклад в повышение устойчивости энергосистем. В данной статье проводится научный анализ преимуществ и экономической эффективности линий HVDC.

ISSN 3030-3907



Высоковольтный переменный и постоянный ток Основные соотношения для систем высоковольтного переменного и постоянного тока следующие:

Мощность переменного тока: $I_d = \frac{P}{U}$

Мощность переменного фазного тока: $I_a = \frac{P}{\sqrt{3}U}$

Потеря мощности в линии: $P_i = I^2R$

Общий КПД: $\eta = 1 - \frac{P_i}{P}$

Сопротивления: R =$\rho\frac{l}{S}$ (bu yerda ρ активное сопротивление на 1 км, l длина)

Параметры

Таблица 1

Передаваемая мощность (P)	1000 MW
Расстояние (*l*)	1000 km
HVDC	500 kV
HVAC	500 kV
активное сопротивление провода на 1 км (400мм²)²(*r*)	0.012 Ω/m
Потери в конверторах HVDC	≈ 0.8 % на 2 конвертора, итого ≈ 1.6 %
Потери в HVAC	Влияние реактивной мощности и тепловые потери ≈ 4 %
Частота	50 Гц (для HVAC)

Расчёт HVDC 500 кВ

По каждому полюсу передаётся половина мощности P/2.

$$I_d = \frac{P}{2U} = \frac{1000\ MVt}{2*500kV} = 1000\ A$$

Сопротивление (один провод на полюс):

ISSN 3030-3907

$$R = r \cdot l = 0.012\ \Omega/km \cdot 1000\ km = 12\ \Omega.$$

Тепловые потери (на каждый полюс):

$$\frac{P_i}{2} = I^2 \cdot R = (1000\ A)^2 \cdot 12\ \Omega = 12\ MW.$$

Суммарные потери в линии по двум полюсам

$$P_i = 2 \cdot 12\ MW = 24\ MW\ (2.4\ \%).$$

Потери в конверторах (два конвертора):

$$\approx 2*0.8\ \% \cdot 1000\ MW = 16\ MW.$$

Суммарные потери в сети HVDC:

$$24\ MW + 16\ MW = 40\ MW\ (\approx 4.0\ \%).$$

КПД системы HVDC:

$$\eta \approx 1 - 40/1000 = 96.0\ \%$$

Расчёт HVAC (500 кВ):

$$I_a = \frac{P}{\sqrt{3}U} = \frac{1000\ MW}{\sqrt{3}*500\ kV} \approx 1154\ A$$

Сопротивление для каждой фазной линии: $R = 12\ \Omega$ (при одинаковом сечении и материале).

Тепловые потери по каждой фазе:

$$\frac{P_r}{3} = I^2 \cdot R \approx (1154\ A)^2 \cdot 12\ \Omega \approx 16\ MW.$$

Суммарные потери по трём фазам:

$$P_r = 3 \cdot 16 \approx 48\ MW\ (\approx 4.8\ \%).$$

С учётом потерь в конверторе, диэлектрических потерь и влияния реактивных токов на большие расстояния принимаем упрощённо 4 % *(≈ 40 MW).*

Суммарные потери в сети HVAC:

$$48\ MW + 40\ MW \approx 88\ MW\ (\approx 8.8\ \%).$$

КПД системы HVAC:

$$\eta_{HVAC} \approx 1 - \frac{88}{1000} = 0.912 = 91.2\%$$

Расстояние, при котором потери в упрощённых сетях AC и DC равны

Нормализуем потери по км и приравниваем для AC и DC.

Потери в линии HVDC на каждый км:

$$p_{DC,km} = 2 \cdot \frac{I_{DC}^2 \cdot r_{km}}{P}$$

Заданные значения:

$$I_{DC} = 1000\ A$$
$$r_{km} = 0.012\Omega/km$$
$$P = 1000\ MW$$

$$p_{DC,km} = 2 \cdot \frac{(1000\ \text{A})^2 \cdot 0.012}{1000\ \text{MW}} \cdot 100\% = 0.000024 \cdot 100\% = 0.0024\ \%$$

ISSN 3030-3907

Вычисляем потери для HVAC на каждый км:

$$p_{AC,km,ohm} \approx 0.0048\ \%/\text{km}$$

Примем дополнительные воздействия для каждого км 0.004 %.

Итого $p_{AC,km} \approx 0.0088\ \%/\text{km}$.

Потери в конверторах HVDC не зависят от длины линии и постоянно составляют ≈ 1,6 %

Условие равенства:

$$1.6\% + 0.0024\% \cdot L = 0.0088\% \cdot L$$

$$L = \frac{1.6}{0.0088 - 0.0024} \approx 250\ km$$

Таким образом, на расстояниях более ~250 км потери HVDC меньше, чем у HVAC.

Упрощённая экономическая модель

Годовая передача энергии:

$$E = P \cdot T$$

Например, $T = 7000\ soat/yil$.

Стоимость потерь:

$$C_y = (P \cdot l\%) \cdot T \cdot t$$

где:

t — стоимость 1 кВт·ч.

$P = 1000\ MW$

$T = 7000\ soat$

$t = 0.05\ \$/kWh$ (тариф α 600 сум)

$t = 0.67\ \$/kWh$ (тариф β 800 сум)

Сравнивая годовые затраты на потери по HVDC и HVAC с разницей в капитальных затратах на терминалы, о’.

Годовые энергетические потери HVDC:

$$1000\ MW \cdot 4\% \cdot 7000\ h = 280{,}000\ MWh = 280\ GWh$$

Годовые энергетические потери HVAC:

$$1000\ MW \cdot 8.79\% \cdot 7000\ h \approx 615{,}300\ MWh = 615.3\ GWh$$

Годовая разница:

$$615.3 - 280 = 335.3\ GWh$$

В денежном выражении:

$$335.3 \times 10^6\ kWh \times 0.05\ \$/kWh = 16.765\ mln\$/yil$$

$$335.3 \times 10^6\ kWh \times 0.067\ \$/kWh = 22.465\ mln\$/yil$$

Если дополнительный капитал терминалов HVDC составляет, скажем, 200 млн $, срок окупаемости в упрощённом videlashtirilgan holda:

(тариф α 600 сум)

ISSN 3030-3907

$$T_{payback} = \frac{200}{16.765} \approx 11.92\ yil$$

(тариф β 800 сум)

$$T_{payback} = \frac{200}{22.465} \approx 8{,}9\ yil$$

Система HVDC окупится за 12 лет за счёт экономии энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ: Системы HVDC более эффективны при передаче электроэнергии на большие расстояния, т.е. свыше 250 км, имеют меньшие потери энергии и окупаются экономически: по тарифа yo‘qotishlari kamroq, iqtisodiy jihatdan esa по тарифу α в течение 12 лет, по тарифу β — за 9 лет окупается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jovcic, D., Van Hertem, D. HVDC Grids: For Offshore and Supergrid of the Future, Second Edition. Wiley, 2022.
2. (Сети HVDC, многотерминальные системы, анализ экономической эффективности.)
3. Pan, J., Xu, Z., Liu, Z. “Recent Progress in Ultra-High Voltage Direct Current (UHVDC) Transmission Technologies.” Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022.
4. (Технологии UHVDC, энергетическая эффективность, тенденции удешевления.)
5. ABB Hitachi Energy. HVDC Light and HVDC Classic – Technology Update Report, 2023.
6. (Современные конверторы, экономическая эффективность, системы цифрового управления.)
7. Siemens Energy. HVDC PLUS Systems - Technical Overview, 2021–2024.
8. (Модульная конверторная технология (MMC), потери, технико-экономические преимущества.)
9. CIGRÉ Working Group B4 Reports.
10. Technical Feasibility of 1200 kV UHVDC Lines, 2021
11. Economics of VSC-HVDC vs AC Transmission, 2022
12. Reliability of Multi-Terminal HVDC Systems, 2023
13. (Наиболее актуальные международные отчёты по экономическому анализу HVDC и надёжности сетей.)
14. Wang, X., Li, H., Xu, J. “Optimal Planning and Cost Analysis of HVDC Transmission for Renewable Integration.” Electric Power Systems Research, 2023.
15. (Модели расчёта экономической эффективности линий HVDC.)
16. Sun, Q., Zhao, J., et al. “Economic Comparison Between HVAC and HVDC for Long-Distance Bulk Power Transmission.” Energies, 2021.

ISSN 3030-3907

17. (Полное экономическое сравнение систем передачи AC и DC.)
18. IEEE Power & Energy Society. HVDC System Design and Modern Converter Stations, 2022.
19. (Цифровое управление, новая архитектура конверторных подстанций.)
20. Zhang, X., Yusheng, X. “Advanced ±1100 kV UHVDC Transmission in China: Performance and Efficiency.” Energy Reports, 2022.
21. (Потери и эффективность в крупнейших системах HVDC мира.)
22. GE Grid Solutions. Digital HVDC - Intelligent Control Systems for DC Grids, 2024.
23. (Цифровизация, управление HVDC с помощью искусственного интеллекта.)

ISSN 3030-3907