

УДК: 621.311

Потапенко Антон Михайлович, Красильникова Татьяна Германовна

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ НАСТРОЕННОЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ИТАТ – ЧЕЛЯБИНСК ПРИ НАЛИЧИИ В ЕЁ СОСТАВЕ ВЛ ИТАТ–ЭКИБАСТУЗ – ЧЕЛЯБИНСК (В ГАБАРИТАХ 1150 КВ)

В настоящей статье обоснована пропускная способность настроенной электропередачи Итат–Челябинск, включающей в свой состав линию Итат–Экибастуз–Челябинск в габаритах 1150 кВ, работающей в настоящее время на напряжении 500 кВ. Рассмотрены этапы работы настроенной электропередачи на напряжении 500 кВ и 750 кВ с учетом всех технических ограничений.

Проведенный анализ позволил оценить пропускную способность ВЛ Итат – Экибастуз – Челябинск (в габаритах 1150 кВ) в составе настроенной электропередачи (НЭП) Итат – Челябинск, а также сделать вывод об необходимости в разработке нестандартного оборудования для реализации вариантов схемы НЭП на напряжении 500 кВ и 750 кВ. Сформулированы технические требования к разработке настраиваемых реакторов при работе НЭП на полную пропускную способность.

Ключевые слова: *Настроенная электропередача, воздушная линия, настраиваемые реакторы, пропускная способность линий электропередач, линия сверхвысокого напряжения.*

Anton Potapenko, Tatyana Krasilnikova

DETERMINATION OF THE TRANSFER CAPABILITY OF THE TUNED POWER TRANSMISSION OF ITAT-CHELYABINSK WHILE AVAILABLE IN ITS COMPLETION OVERHEAD LINE ITAT-EKIBASTUS-CHELYABINSK (IN THE 1150 KV DIMENSIONS)

This article justifies the transfer capability of the tuned power transmission of Itat-Chelyabinsk power transmission line, which includes the Itat-Ekibastuz-Chelyabinsk line in the 1150 kV dimensions, which is currently operating at a voltage of 500 kV. The stages of operation of tuned power transmission at a voltage of 500 kV and 750 kV are considered taking into account all technical limitations.

The analysis made it possible to estimate the transfer capability of the Itat-Ekibastuz-Chelyabinsk overhead transmission line as part of the tuned Itat-Chelyabinsk power transmission line (TPT), and to make a conclusion about the necessity of developing special equipment for the implementation of TPT circuit variants at a voltage of 500 kV and 750 kV. The technical requirements for the development of tuning reactors for TPT operation at full transfer capability are defined.

Key words: *Tuned power transmission, overhead line, tuning reactors, transfer capability, ultrahigh overhead line.*

ВВЕДЕНИЕ

Повышение пропускной способности электрических связей между ОЭС Сибири и ОЭС Урала позволяет повысить эффективность работы этих энергосистем. В [1, 2] было показано, что наиболее эффективное решение этой проблемы состоит в использовании ВЛ Итат – Экибастуз – Челябинск (в габаритах 1150 кВ) в составе настроенной электропередачи (НЭП) Итат – Челябинск. В этих работах рассматривался двухэтапный ввод НЭП в работу. На первом этапе для передачи 1500–2000 МВт использовалась схема НЭП на напряжении 500 кВ. На втором этапе передаваемая мощность увеличивалась до 3000 МВт за счет перехода к схеме НЭП на напряжении 750 кВ. Однако в этих работах отсутствует оценка возможной максимальной передаваемой мощности НЭП, то есть оценка её пропускной способности на каждом из этапов. Настоящая статья посвящается решению этого вопроса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

НЭП 500 кВ Итат – Челябинск (первый этап). Применительно к задаче определения пропускной способности НЭП Итат – Челябинск на напряжении 500 кВ принципиальная схема показана на рисунке 1.

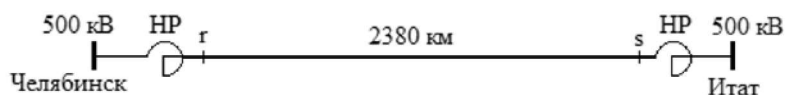


Рис. 1. Принципиальная схема НЭП 500 кВ Итат – Челябинск на первом этапе

В тех случаях, когда длина линии значительно меньше полуволновой длины $l_p \approx 3000$ км, возникает задача её настройки. Операция настройки линии заключается в изменении ее параметров таким образом, чтобы настроенная линия обладала свойствами полуволновой. Для достижения основной цели настройки (обеспечения работы на устойчивой ветви угловой характеристики) достаточно осуществить настройку по взаимному сопротивлению, когда в качестве настраивающих устройств используются настраивающие реакторы (НР).

Условие настройки в этом случае имеет вид:

$$I_m \times B_{ич} = 0, \quad (1)$$

где $B_{ич}$ – взаимное сопротивление линии с учетом НР.

Из этого условия следует выражение для величины сопротивления НР:

$$X_{НР} = Z_w \left[\frac{1}{\sin \lambda} + \frac{1}{\operatorname{tg} \lambda} \right], \quad (2)$$

где Z_w – волновое сопротивление линии; λ – электрическая длина линии.

При $Z_w = 250$ Ом и $\lambda = 2,55$ рад сопротивление НР с одной из сторон составит $X_{НР} = 76$ Ом. Учитывая, что в настройке линии до полуволны частично можно использовать сопротивления примыкающих систем, сопротивление НР можно уменьшить и принять $X_{НР} = 66$ Ом.

Пропускная способность однородной полуволновой линии с достаточной степенью точности оценивается на основе следующего простого выражения

$$P_{эп} = \frac{U_{ср. доп} U_{ПС. доп}}{Z_w}, \quad (3)$$

где $U_{ср. доп}$ – допустимое напряжение в средней части линии; $U_{ПС. доп}$ – допустимое напряжение для подстанционного оборудования.

Если принять, что допустимое напряжение в средней части линии класса 1150 кВ соответствует её наибольшему рабочему напряжению $U_{ср. доп} = U_{нр. вл} = 1200$ кВ, а допустимое напряжение для подстанционного оборудования класса 500 кВ также соответствует его наибольшему рабочему напряжению $U_{ПС. доп} = U_{нр. ПС} = 525$ кВ, то пропускная способность однородной полуволновой линии согласно (3) составит $P_{эп} = 2520$ МВт.

Однако для линии, длина которой существенно отличается от полуволновой и оснащенной соответственно НР, требуется проверка полученного значения пропускной способности по (3) путем непосредственного расчета нормального режима в этой схеме (Рисунок 1), включая распределение напряжения вдоль линии.

Минимальные активные потери в полуволновой линии имеют место в том случае, если по ее концам потоки реактивной мощности не превышают 5–10 % от передаваемой активной мощности. При этом в режимах передачи максимальных мощностей напряжение на отправном конце должно поддерживаться близким к максимальному рабочему напряжению. Для линий, длина которых су-

ущественно меньше полуволновой, такая простота в оптимизации режимов отсутствует, поскольку в конечных пунктах таких линий требуется поддержание значительного потока реактивной мощности, который зависит от величины передаваемой активной мощности и в общем случае неизвестен. При этом нет ясности, какое напряжение должно поддерживаться на отправном конце. Однако расчеты нормальных режимов в таких линиях существенно упрощаются, если воспользоваться фантомными элементами, включаемыми по концам линии [3].

Фантомная схема представляет каскадное включение идеальных линий положительной и отрицательной электрической длины. Матрица параметров линии положительной электрической длины имеет вид:

$$M_e = \begin{vmatrix} \cos \lambda_e & jZ_w \sin \lambda_e \\ j \frac{\sin \lambda_e}{Z_w} & \cos \lambda_e \end{vmatrix}, \quad (4)$$

а соответствующая матрица линии отрицательной электрической длины имеет вид:

$$\bar{M}_e = \begin{vmatrix} \cos(-\lambda_e) & jZ_w \sin(-\lambda_e) \\ j \frac{\sin(-\lambda_e)}{Z_w} & \cos(-\lambda_e) \end{vmatrix}, \quad (5)$$

где λ_e – электрической длины фантомной линии; Z_w – волновое сопротивление настраиваемой линии.

Каскадное включение линий одинаковой положительной и отрицательной электрической длины приводит к их взаимной компенсации, и поэтому такой элемент называется фантомным, т. е. мнимым.

Электрическая длина фантомного элемента выбираются так, чтобы выполнялось условие:

$$\lambda + 2\lambda_e = \pi. \quad (6)$$

Включение фантомного элемента в любую точку схемы не меняет каких-либо ее свойств, поскольку электрическая длина его равна нулю, и соответственно матрица его параметров является единичной. Если исходная линия отличается от полуволновой, то использование фантомных элементов позволяет провести эквивалентные преобразования с искусственным выделением полуволновой схемы между пунктами e_1 и e_2 .



Рис. 2. Расчетная схема НЭП 500 кВ на первом этапе с фантомными элементами

Установление оптимального режима по концам такой схемы, как и для реальной полуволновой линии, не представляет трудностей, так как такой режим в узле e_1 при выдаче максимальной активной мощности характеризуется незначительной реактивной мощностью (5–10 % от передаваемой активной мощности), а напряжение задается в диапазоне между номинальным и максимальным рабочим напряжениями.

При заданной мощности и напряжении в фантомном узле s_{e1} и u_{e1} определяется распределение напряжений и мощностей справа и слева от фантомного узла (Рисунок 3).

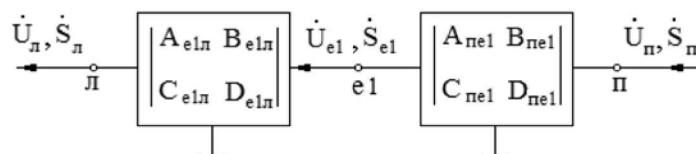


Рис. 3 – Схема для расчета режима справа и слева от фантомного узла

Расчет режима справа осуществляется согласно соотношениям (7):

$$\begin{aligned}\dot{U}_n &= A_{ne1}\dot{U}_{e1} + B_{ne1}\frac{\bar{s}e1}{e1}, \\ S_n &= \bar{C}_{ne1}\dot{U}_n\bar{U}_{e1} + \bar{D}_{ne1}\frac{\dot{U}_n}{U_{e1}}S_{e1},\end{aligned}\quad (7)$$

а слева по выражениям (8):

$$\begin{aligned}\dot{U}_a &= D_{e1a}\dot{U}_{e1} - B_{e1a}\frac{\bar{s}e1}{e1}, \\ S_a &= -\bar{C}_{e1a}\dot{U}_a\bar{U}_{e1} + \bar{A}_{e1a}\frac{\dot{U}_a}{U_{e1}}S_{e1},\end{aligned}\quad (8)$$

где $A_{ne1}, B_{ne1}, C_{ne1}, D_{ne1}$ – коэффициенты правого четырехполюсника; $A_{e1a}, B_{e1a}, C_{e1a}, D_{e1a}$ – коэффициенты левого четырехполюсника.

НЭП 750 кВ Итат – Челябинск (второй этап). Применительно к задаче определения пропускной способности НЭП Итат – Челябинск на напряжении 750 кВ принципиальная схема показана на рисунке 4.

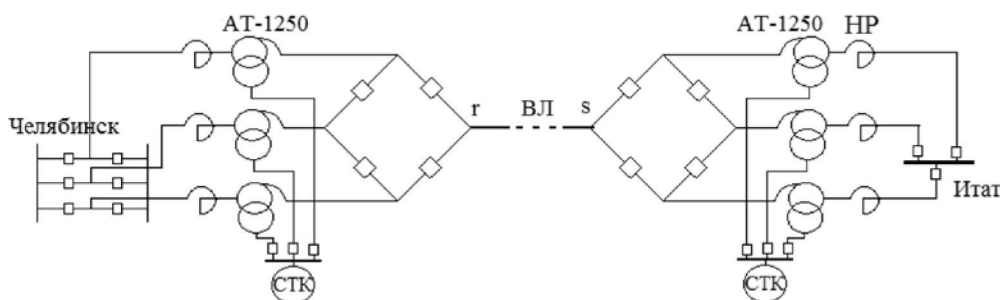


Рис. 4. Принципиальная схема НЭП 750кВ Итат – Челябинск на втором этапе

Для данной схемы в настройке её по взаимному сопротивлению следует учитывать не только настраиваемые реакторы, но и автотрансформаторы. Тогда из условия настройки (1) следует выражение для эквивалентной величины трех параллельно включенных НР на стороне 500 кВ

$$X_{НР3} = \left(Z_w \left(\frac{1}{\sin \lambda} + \frac{1}{\operatorname{tg} \lambda} \right) - X_{АТ3} \right) \left(\frac{500}{750} \right)^2, \quad (9)$$

где $X_{АТ3}$ – эквивалентное сопротивление трех параллельно включенных автотрансформаторов на высокой стороне.

Учитывая, что $X_{АТ3} = 55/3 \text{ Ом}$, получим из (9) $X_{НР3} = 25,8 \text{ Ом}$. Поскольку в настройке линии до полуволны частично можно использовать сопротивления примыкающих систем, эквивалентное сопротивление НР может быть принято $X_{НР3} = 22 \text{ Ом}$. Тогда соответственно сопротивление отдельного НР составит $X_{НР} = 66 \text{ Ом}$, как и для схемы НЭП на напряжении 500 кВ.

При допустимом напряжении в средней части линии класса 1150 кВ равном её наибольшему рабочему напряжению и допустимом напряжении для подстанционного оборудования класса 750 кВ, также соответствующем его наибольшему рабочему напряжению $U_{пс. доп} = U_{нр. пс} = 787 \text{ кВ}$, пропускная способность однородной полуволновой линии согласно (3) составит $P_{эП} = 3780 \text{ МВт}$. Однако следует иметь в виду, что суммарная пропускная способность трех автотрансформаторов составляет всего лишь $S_{АТ3} = 3750 \text{ МВА}$. Кроме того, требуется проверка полученного значения пропускной способности по (3) путем непосредственного расчета нормального режима в этой схеме (рисунок 4), включая распределение напряжения вдоль линии.

Как и для схемы первого этапа на напряжении 500 кВ, в данном случае также правомерно воспользоваться расчетной схемой с фантомными элементами, изображенной на рисунке 5.

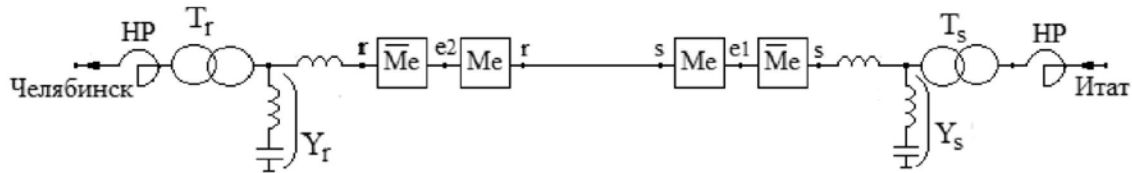


Рис. 5. Расчетная схема НЭП 750 кВ на втором этапе с фантомными элементами

На этой схеме поперечные проводимости Y_s, Y_r моделируют источники реактивной мощности типа статических тиристорных компенсаторов (СТК), подключенные к третичным обмоткам автотрансформаторов. Соответственно, T_s, T_r моделируют идеальные трансформаторы, которые отражают переход от высокой стороны автотрансформатора к его средней стороне.

Как было уже отмечено выше, расчет оптимального режима по концам схемы, включающей линию и фантомные элементы, как и для реальной полуволновой линии не представляет трудностей, так как такой режим в узле e_1 при выдаче максимальной активной мощности характеризуется незначительной реактивной мощностью (5 – 10% от передаваемой активной мощности), а напряжение задается в диапазоне между номинальным и максимальным рабочим напряжениями.

При заданной мощности и напряжении в фантомном узле s_{e1} и v_{e1} определяется распределение напряжений и мощностей справа от фантомного узла согласно (7) и слева от него согласно (8).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

НЭП 500 кВ Итат – Челябинск (первый этап).

В результате проведенных расчетов выявлено, что пропускная способность схемы НЭП на напряжении 500 кВ, при которой удовлетворяются технические требования на режим, составляет 2500 МВт. На рисунке 6 показано распределение напряжений вдоль линии. Максимально допустимое напряжение имеет место в средней части линии в районе Экибастуза.

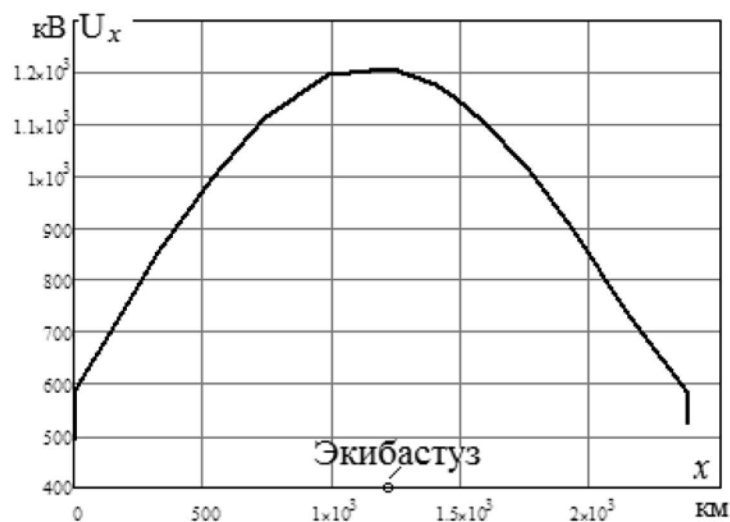


Рис. 6. Распределение напряжений вдоль линии при передаче 2500 МВт

В таблице 1 даны режимные параметры для подстанций в Итате и Челябинске. В этой же таблице приведены данные по условиям работы НР, которые диктуют технические требования к разработке НР.

Таблица 1

Результаты расчета режима в схеме НЭП 500 кВ

Напряжение, кВ		Мощность, МВт		КПД, %	Настраивающий реактор	
Итат	Челябинск	Итат	Челябинск		Напряжение, кВ	Ток, кА
525	489	2500 + j280	2233 + j150	89,3	590	2,76

Как следует из таблицы 1, НР с небольшим запасом должен быть рассчитан на работу при максимально допустимом напряжении $U_{НР. доп} = 600 \text{ кВ}$ и при максимально допустимом токе $I_{НР. доп} = 2,8 \text{ кА}$.

НЭП 750 кВ Итат – Челябинск (второй этап).

В результате проведенных расчетов выявлено, что пропускная способность схемы НЭП на напряжении 750 кВ, при которой удовлетворяются технические требования на режим, составляет 3650 МВт. На рисунке 7 приведено распределение напряжений вдоль линии. Максимально допустимое напряжение имеет место в средней части линии в районе Экибастуза.

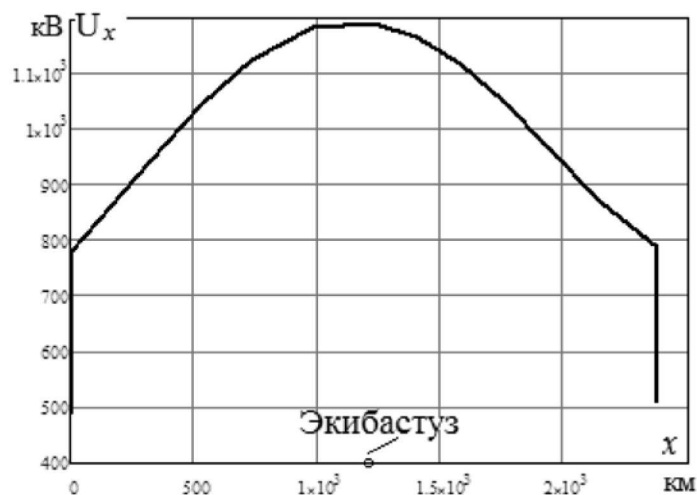


Рис. 7. Распределение напряжений вдоль линии при передаче 3650 МВт

В таблице 2 приведены режимные параметры для подстанций в Итате и Челябинске. В этой же таблице показаны данные по условиям работы НР, которые диктуют технические требования к разработке НР.

Таблица 2

Результаты расчета режима в схеме НЭП 750 кВ

Напряжение, кВ		Мощность, МВт		КПД, %	Настраивающий реактор	
Итат	Челябинск	Итат	Челябинск		Напряжение, кВ	Ток, кА
509	485	3650+j440	3330+j130	91,0	515	1,4

С небольшим запасом НР должны быть рассчитаны на работу при максимально допустимом напряжении $U_{НР. доп} = 525 \text{ кВ}$ и при максимально допустимом токе $I_{НР. доп} = 1,5 \text{ кА}$.

Настраиваемые реакторы, предназначенные для работы на первом этапе, также используются на втором этапе, так что дополнительно требуется создание ещё четырех НР, которые работают в более лёгких условиях последовательно с автотрансформаторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ показал, что использование ВЛ Итат – Экибастуз – Челябинск (в габаритах 1150 кВ) в составе настроенной электропередачи (НЭП) Итат – Челябинск позволяет иметь пропускную способность в схеме НЭП 500 кВ на первом этапе 2500 МВт и в схеме НЭП 750 кВ на втором этапе 3650 МВт.
2. Для реализации вариантов схемы НЭП на напряжении 500 кВ и 750 кВ потребность в разработке нестандартного оборудования сводится лишь к созданию настраиваемых реакторов, устанавливаемых на стороне 500 кВ. Сформулированы технические требования к разработке настраиваемых реакторов при работе НЭП на полную пропускную способность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бушуев В. В., Зильберман С. М., Красильникова Т. Г., Самородов Г. И. Техничко-экономический анализ путей увеличения пропускной способности ВЛ Итат – Экибастуз – Челябинск (в габаритах 1150 кВ) до 3000 МВт // *Электричество*. 2013, № 11.
2. Зильберман С. М., Красильникова Т. Г., Потапенко А. М., Самородов Г. И. Техничко-экономические преимущества использования воздушной линии Итат–Экибастуз–Челябинск (в габаритах 1150 кВ) в составе полуволновой электропередачи Итат – Челябинск // *Электричество*, 2017, № 1.
3. Зильберман С. М., Самородов Г. И. Сверхдальние электропередачи полуволнового типа. Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2010. 327 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Потапенко Антон Михайлович, ученый секретарь Научно-технического совета Филиала АО «НТЦ ФСК ЕЭС» – СибНИИЭ, г. Новосибирск. E-mail: potapenko@ntcsib.ru.

Красильникова Татьяна Германовна, д.т.н., доцент ФГБОУ ВО «НГТУ», Новосибирск. E-mail: tatka552005@ya.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Potapenko Anton, Secretary of Scientific and Technical Board, R&D Center@FGC UES, Siberian branch, Russian Federation, 630126, Novosibirsk, E-mail: tatka552005@ya.ru

Krasilnikova Tatyana, D.Sc., Associate Professor of «NSTU», Novosibirsk. E-mail: tatka552005@ya.ru