

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ПЕРЕДАВАЕМУЮ МОЩНОСТЬ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Шепелев Александр Олегович

кандидат технических наук, доцент,
Югорский государственный университет
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: a_shepelev@ugrasu.ru

Шепелева Елена Юрьевна

старший преподаватель,
Югорский государственный университет
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: e_shepeleva@ugrasu.ru

Швецов Сергей Юрьевич

аспирант,
Югорский государственный университет
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: shvetcovsy@yandex.ru

Предмет исследования: в настоящей работе проводится оценка статической устойчивости электроэнергетических систем с учетом температурной зависимости активных сопротивлений.

Цель исследования: показать, как учет температурной зависимости активных сопротивлений будет влиять на запасы статической устойчивости электроэнергетических систем.

Методы и объекты исследования: произведены расчеты режима с учетом влияния тепловых процессов в элементах энергосистемы. Основным параметром для учета тепловых процессов является температура окружающего воздуха, поэтому были определены дни с максимальной и минимальной среднесуточной температурой воздуха. Все параметры, кроме температуры окружающего воздуха и скорости ветра, подобраны таким образом, чтобы обеспечить наихудшие условия для теплового обмена. Результаты проведенных расчетов показывают, что учет тепловых процессов в элементах системы значительно влияет на передаваемую мощность и запасы статической аperiodической устойчивости в энергосистеме.

Основные результаты исследования: практические расчеты показали, что учет тепловых процессов позволяет более точно учитывать пределы передаваемой мощности через элементы энергосистемы, и вместе с тем коэффициенты запаса по статической устойчивости.

Ключевые слова: электроэнергетический режим, предельный переток, температурные режимы, воздушные линии электропередачи.

ANALYSING THE INFLUENCE OF TEMPERATURE DEPENDENCE OF ACTIVE RESISTANCES ON TRANSMITTED POWER IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

Alexander O. Shepelev

Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: a_shepelev@ugrasu.ru

Elena Yu. Shepeleva

Senior Lecturer,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: e_shepeleva@ugrasu.ru

Sergey Yu. Shvecov

postgraduate student,
Assistant Professor,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: shvetcovsy@yandex.ru

Subject of research: in this paper, the static stability of electric power systems is assessed taking into account the temperature dependence of active resistances.

Purpose of research: to show how the consideration of the temperature dependence of active resistances will affect the static stability reserves of electric power systems.

Methods and objects of research: calculations of the regime with account of influence of thermal processes in elements of power system are made. The main parameter to take into account thermal processes is the ambient air temperature, so the days with maximum and minimum average daily air temperature were determined. All parameters except ambient air temperature and wind speed were selected in such a way as to provide the worst conditions for thermal exchange. The results of the calculations show that taking into account the thermal processes in the elements of the system significantly affects the transmitted power and the reserves of static aperiodic stability in the power system.

Main results of research: practical calculations have shown that the account of thermal processes allows to take into account more accurately the limits of the transmitted power through the elements of the power system, and at the same time the reserve coefficients of static stability.

Keywords: electric power mode, limit flow, temperature modes, overhead power lines.

ВВЕДЕНИЕ

Интеграция в процесс планирования электроэнергетического режима [1] режимно-климатических факторов позволит улучшить прогнозирование перетоков активной мощности и предотвратить возможные аварийные ситуации. Дополнительная информация о климатических факторах поможет оперативно-диспетчерским службам принимать

более обоснованные решения и эффективно управлять энергосистемой.

Анализ допустимых перетоков активной мощности в контролируемом сечении является ключевым аспектом обеспечения надежного функционирования электроэнергетических систем. С развитием вычислительных моделей [2, 3] и ростом вычислительных мощностей персональных компьютеров стало возможным проводить более точные и быстрые

расчеты, что значительно упрощает анализ устойчивости в крупных энергосистемах [4].

Оценка запасов устойчивости на основе анализа установившихся режимов играет важную роль, позволяя оперативно реагировать на изменения нагрузки, состояние сети и других факторов, которые могут повлиять на стабильность работы системы, что позволяет обеспечить непрерывное электроснабжение потребителей.

Учет тепловых процессов в элементах ЭЭС является важным шагом для более точного определения запасов статической апериодической устойчивости [5, 6]. Тепловые процессы в некоторых режимах существенно влияют на работу оборудования электрических сетей, особенно в условиях повышенной нагрузки или изменяющихся условий эксплуатации. Включение тепловых моделей элементов [7] в анализ устойчивости позволяет учитывать динамику температурных изменений и возникающих потерь мощности и энергии, которые могут оказывать влияние на стабильность системы. Это особенно важно при оценке работоспособности электрической системы в экстремальных условиях или при перегрузках [8].

Наибольший вклад в фактическую температуру провода воздушной линии электропередачи вносят следующие факторы: джоулевы потери, инфракрасное излучение, конвекция (естественная или вынужденная) и солнечная радиация [9, 10, 11, 12].

Влияние солнечной радиации существенно только для регионов с жарким климатом [13], в регионах с умеренным климатом её можно не учитывать [11, с. 6], для вечернего времени учёт солнечной радиации можно не проводить [12].

Предлагаемый в работе подход к учету дополнительных факторов, влияющих на фактическую температуру токопроводящих частей элементов электрических сетей во время планирования электроэнергетического режима, является важным шагом для повышения точности расчетов и обеспечения более надежной работы энергосистемы. Учет солнечного излучения, скорости и направления ветра позволит более точно оценить условия работы оборудования и оптимизировать процессы генерации и распределения электроэнергии.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Численное моделирование электроэнергетического режима электрической системы произведём в ПК RastrWin3 и ПК Mathcad (составленного на основе алгоритма [6, 14]). Анализ статической апериодической устойчивости заключается в необходимости, прежде всего, рассчитать нормальный установившийся режим [15]. Далее происходит выбор сечений (элементов системы), в которых будет контролироваться изменение режимных параметров. После этого начинается последовательное утяжеление режима до момента расхождения итерационного процесса и получения предельного установившегося режима. Затем, исходя из полученного предельного перетока активной мощности через контролируемые элементы системы, определяются максимально допустимые и аварийно-допустимые перетоки мощности.

Произведем расчеты режима с учетом влияния тепловых процессов в элементах энергосистемы. Расчетная схема приведена на рисунке 1. Исходные данные для расчетов приведены в таблицах 1, 2 и 3. Основным параметром для учета тепловых процессов

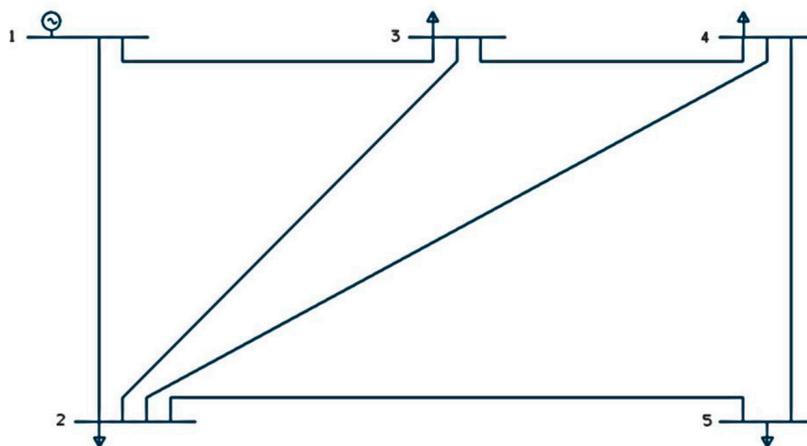


Рисунок 1. Расчетная схема IEEE 5.

Таблица 1. Исходные данные узлов для расчета электрического режима.

Номер узла	Напряжение узла, кВ	$P_{нагр}$, МВт	$Q_{нагр}$, МВАр	$P_{ген}$, МВт
1	121	–	–	Балансирующий
2	110	20	10	–
3	110	40	20	–
4	110	40	5	–
5	110	60	10	–

является температура окружающего воздуха, поэтому необходимо определить дни с самой максимальной и минимальной среднесуточной температурой воздуха. Исходя из анализа погодных архивов, день с самой минимальной среднесуточной температурой приходится на 24 января, температура составляет $-35,63$ °С, день с самой максимальной среднесуточной температурой приходится на 3 июля с температурой $29,25$ °С. Среднесуточная скорость ветра в оба этих дня составила 3 метра в секунду (параметры представлены для г. Омска). Все параметры, кроме температуры окружающего воздуха и скорости ветра, подобраны таким образом, чтобы обеспечить наихудшие условия для теплового обмена (охлаждения ЛЭП).

Результаты расчетов нормального и предельного установившегося режимов приведены в таблицах 4, 5 и 6, 7; для дня с минимальной и максимальной среднесуточной температурой соответственно. Под предельным режимом в данном случае понимаются режимы, когда фактическая температура достигает 70 °С (максимально допустимая температура провода) и 90 °С (аварийно допустимая температура провода).

Из топологического анализа электрической сети видно, что линии 1–2 и 1–3 являются наиболее загруженными относительно их значений длительно-допустимых токов. Данный факт позволяет их включить в контролируемое сечение и рассматривать его далее при анализе предельных перетоков.

Таблица 2. Исходные данные ветвей для расчета электрического режима.

Ветвь	Марка провода	Длина, км	Длительно допустимые токовые нагрузки, А	Аварийно допустимые токовые нагрузки, А
1–2	АС-240/32	70	605	726
1–3	АС-240/32	30	605	726
2–3	АС-240/32	60	605	726
2–4	АС-240/32	40	605	726
2–5	АС-240/32	65	605	726
3–4	АС-240/32	45	605	726
4–5	АС-240/32	40	605	726

Таблица 3. Параметры учета тепловых процессов.

Вид параметра	Значение
Максимальная среднесуточная температура, °С	29,25
Минимальная среднесуточная температура, °С	$-35,63$
Скорость ветра, м/с	3
Давление, Па	101216

Расчет с учётом минимальной среднесуточной температуры окружающей среды

Таблица 4. Результаты расчетов нормального и предельного установившегося режимов для узлов системы (минимальная среднесуточная температура).

Номер узла	Значение в нормальном установившемся режиме		Значение в предельном установившемся режиме ($\theta_{\text{доп}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$)		Значение в предельном установившемся режиме ($\theta_{\text{доп}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$)	
	Напряжение U , кВ	Угол δ , град.	Напряжение U , кВ	Угол δ , град.	Напряжение U , кВ	Угол δ , град.
1	121	0	121	0	121	0
2	110,92	6,59	96,51	13,64	94,02	14,56
3	113,13	4,76	101,67	9,17	99,61	9,63
4	109,39	8,37	93,56	17,37	90,79	18,69
5	107,38	10,49	89,77	21,96	86,71	23,68

Таблица 5. Результаты расчетов нормального и предельного установившегося режимов для линий (минимальная среднесуточная температура).

Ветвь	Значение в нормальном установившемся режиме		Значение в предельном установившемся режиме ($\theta_{\text{доп}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$)		Значение в предельном установившемся режиме ($\theta_{\text{доп}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$)	
	Ток линии $I_{\text{л}}$, А	Мощность в начале ветви $P_{\text{нач}}$, МВт	Ток ветви $I_{\text{л}}$, А	Мощность в начале ветви $P_{\text{нач}}$, МВт	Ток ветви $I_{\text{л}}$, А	Мощность в начале ветви $P_{\text{нач}}$, МВт
1-2	326,48	61,09	690,15	117,66	742,60	124,27
1-3	568,09	106,19	1161,64	204,71	1243,28	217,09
2-3	95,95	17,60	212,13	33,74	228,42	35,39
2-4	127,89	24,06	235,84	38,28	252,09	39,73
2-5	173,87	32,41	317,85	50,77	339,88	52,67
3-4	241,26	45,34	491,34	81,17	527,38	84,96
4-5	154,86	28,44	281,57	43,8	301,19	45,37



Расчет с учётом максимальной среднесуточной температуры окружающей среды

Таблица 6. Результаты расчетов нормального и предельного установившегося режимов для узлов системы (максимальная среднесуточная температура).

Номер узла	Значение в нормальном установившемся режиме		Значение в предельном установившемся режиме ($\theta_{\text{доп}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$)		Значение в предельном установившемся режиме ($\theta_{\text{доп}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$)	
	Напряжение U , кВ	Угол δ , град.	Напряжение U , кВ	Угол δ , град.	Напряжение U , кВ	Угол δ , град.
1	121	0	121	0	121	0
2	109,68	6,48	107,33	7,68	103,63	9,40
3	112,19	4,64	110,37	5,45	107,48	6,54
4	107,87	8,31	105,27	9,80	101,19	11,98
5	105,51	10,43	102,58	12,32	98,01	15,08

Таблица 7. Результаты расчетов нормального и предельного установившегося режимов для линий (максимальная среднесуточная температура).

Ветвь	Значение в нормальном установившемся режиме		Значение в предельном установившемся режиме ($\theta_{\text{доп}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$)		Значение в предельном установившемся режиме ($\theta_{\text{доп}} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$)	
	Ток линии $I_{\text{л}}$, А	Мощность в начале ветви $P_{\text{нач}}$, МВт	Ток ветви $I_{\text{л}}$, А	Мощность в начале ветви $P_{\text{нач}}$, МВт	Ток ветви $I_{\text{л}}$, А	Мощность в начале ветви $P_{\text{нач}}$, МВт
1–2	331,23	62,03	393,14	72,78	484,08	87,82
1–3	574,99	107,69	677,51	125,89	826,57	151,55
2–3	97,42	17,69	117,31	20,83	146,37	25,07
2–4	129,91	24,16	148,09	26,95	175,12	30,73
2–5	176,83	32,59	200,89	36,18	236,84	41,06
3–4	244,97	45,69	287,48	52,61	349,98	62,07
4–5	157,65	28,56	178,69	31,55	210,25	35,61



ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Результаты проведенных расчётов показывают, что учет тепловых процессов в элементах системы значительно влияет на передаваемую мощность и запасы статической аperiodической устойчивости в энергосистеме. В день минимальной среднесуточной температуры провода линий электропередачи получают наибольшее охлаждение, что влияет на температуру провода и возможность передавать большую мощность (передаваемая мощность увеличилась в 1,927 и 2,04 раза, при достижении длительно допустимой и аварийно допустимой температур соответственно). В день максимальной среднесуточной температуры по линиям электропередачи электроэнергия передается в условиях наихудшего охлаждения, в результате передаваемая мощность значительно ниже, чем при расчете в день минимальной среднесуточной температуры (передаваемая мощность относительно режима без учёта тепловых процессов увеличилась в 1,17 и 1,41 раза, при достижении длительно допустимой и аварийно допустимой температур соответственно). В большей степени это связано с тем, что при расчете без учета тепловых процессов все активные сопротивления приведены к температуре окружающей среды 20 °С.

Тепловые процессы в элементах зависят от ряда климатических факторов, а также географического расположения линий электропередачи. Необходимость учета этих параметров подталкивает к развитию и применению геоинформационных систем при расчете режимов и анализе работы энергосистемы. Необходима разработка нормативной базы учета климатических факторов, что также потребует расширения функционала программных комплексов, применяемых различными сетевыми организациями при работе с электрическими режимами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Требования к обеспечению надёжности электроэнергетических систем, надёжности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Методические указания по устойчивости энергосистем»: Приказ Министерства энергетики РФ от 3 августа 2018 г. № 630. – Текст : непосредственный.
2. Александров, А. С. Расчет максимально допустимых перетоков в системе мониторинга запасов устойчивости / А. С. Александров, Д. М. Максименко, В.Г. Неуймин. – Текст : непосредственный // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2014. – № 1 (70). – С. 13-23.
3. Аюев, Б. И. Оптимизационная модель предельных режимов электрических систем / Б. И. Аюев, В. В. Давыдов, П. М. Ерохин. – Текст : непосредственный // Электричество. – 2010. – № 11. – С. 2-12.
4. Аюев, Б. И. Оптимизационные вычислительные модели предельных режимов электрических систем для заданного направления утяжеления / Б. И. Аюев, В. В. Давыдов, П. М. Ерохин. – Текст : непосредственный // Электричество. – 2010. – № 12. – С. 2-7.
5. Васьковская, А. В. Определение максимально допустимого перетока активной мощности в сечении с учетом тепловых режимов линий электропередачи / А. В. Васьковская, А. О. Шепелев, Е. Ю. Шепелева. – Текст : непосредственный. – DOI: 10.18822/byusu202301131-138 // Вестник Югорского государственного университета. – 2023. – № 1(68). – С. 131-138.
6. Шепелев, А. О. Анализ влияния климатических факторов на допустимые перетоки активной мощности в энергосистемах / А. О. Шепелев. – Текст : непосредственный. – DOI: 10.17213/0136-3360-2024-1-105-114 // Изв. вузов. Электромеханика. – 2024. – Т. 67, № 1. – С. 105-114.
7. Frank, S. Temperature-Dependent Power Flow / S. Frank, J. Sexauer, S. Mohagheghi. – DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2266409 // IEEE Transactions on Power System. – 2013. – Vol. 28, № 4. – Pp. 4007–4018.
8. Данилов, М. И. Определение потоков мощности и температуры проводов электрической сети установившегося состояния энергосистемы / М. И. Данилов, И. Г. Романенко. – Текст : непосредственный // Электрические станции. – 2022. – № 7. – С. 25–37.
9. IEEE Std. 738-2012. (Revision of IEEE Std 738-2006 – Incorporates IEEE Std 738-2012 Cor 1–2013). Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. – NY, The USA: IEEE, 2012. – 72 p.
10. CIGRE. Guide for thermal rating calculations of overhead lines / Working group B2.43. – 2014.
11. Методика расчёта предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий: СТО 56947007-29.240.55.143–2013. – М. : ОАО «ФСК ЕЭС», – 2013. – 67 с. – Текст : непосредственный.
12. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям нагрева проводов для действующих линий электропередачи // РД 34.20.547 (МТ 34-70-037-87). – М. : ВНИИЭ, 1988. – 12 с. – Текст : непосредственный.
13. Kotni, L. A proposed algorithm for an overhead transmission line conductor temperature rise calculation / Lahouari Kotni. – DOI: 10.1002/etep.1715 // International Transactions On Electrical Energy Systems Int. Trans. Electr. Energ. Syst. – 2014. – 24. – pp. 578–596.
14. Шепелев, А. О. Применение метода внутренней температурной коррекции для расчёта установившихся режимов электроэнергетических систем с учётом тепловых процессов в элементах / А. О. Шепелев. – Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. – 2020. – № 9. – С. 9–19.
15. Жданов П. С. Вопросы устойчивости электрических систем / П. С. Жданов. – Энергия, 1979. – Текст : непосредственный.