

УДК 621.316.1:519.816

А. В. Каминский, к. т. н.; В. В. Каминский, к. т. н.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАПАСОВ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В работе проанализировано и формализовано понятие запаса пропускной способности силового элемента системы электроснабжения (СЭС) с учетом всех условий допустимой эксплуатации этого элемента. Предложены математическая и компьютерная модели процессов определения запаса пропускной способности кабельных линий, пригодные для использования в условиях расширения производства, модернизации технологических процессов и подключения новых потребителей электроэнергии к существующей электросети.

Ключевые слова: запас пропускной способности, расчетная нагрузка, допустимость режима работы элемента СЭС, математическая модель, компьютерная модель, пассивные и активные ограничения, кабельная линия.

Введение

Эффективность капиталовложений в системы электроснабжения (СЭС) формируется уже на начальных стадиях их проектирования в процессе определения электронагрузок силовых элементов СЭС. Занижение расчетных электронагрузок может привести к недостаточной пропускной способности элементов СЭС и их преждевременному выходу из строя, а завышение – к необоснованному увеличению капиталовложений на их сооружение и ухудшению электромагнитной совместимости элементов СЭС. Принимая во внимание важность точного прогнозирования расчетных нагрузок, методы их определения регламентируются с 1961 года [1], а научные работы по усовершенствованию и уточнению этих методов остаются актуальными до настоящего времени (смотри, например, [2 – 5]).

С 1961 года редакция нормативного документа [1] года несколько раз претерпевала изменения и уточнения, которые учитывали новые результаты исследований электронагрузок элементов СЭС. На это время в Украине действующим аналогом этого документа являются руководящие технические материалы [6].

Согласно [6] расчетной называется условно неизменная нагрузка элемента СЭС, которая эквивалентна реальной изменяющейся во времени нагрузке этого элемента по максимальной температуре его нагрева.

Как известно, для разных проводников в [7] нормируется максимально допустимый ток, который соответствует продолжительно допустимой температуре нагрева проводника. При известной расчетной нагрузке элемента СЭС становится возможным применить эти нормированные значения тока для случая изменяющейся во времени нагрузки.

Близким по значению к понятию расчетной нагрузки является понятие запаса пропускной способности силового элемента СЭС. В отличие от известных на это время работ, посвященных созданию новых и усовершенствованию существующих методов определения расчетных нагрузок, в данной работе рассматривается задача определения запасов пропускной способности элементов СЭС в процессе их эксплуатации. Понятие запаса пропускной способности в настоящее время еще не имеет формального общепринятого определения. В данной работе делается попытка ввести строгое определение исходя из интуитивного понимания запаса пропускной способности как максимально возможной величины нагрузки, которую способен нести элемент СЭС сверх существующей его нагрузки. Показано, что методы определения расчетной нагрузки и определения запасов пропускной способности

элементов СЭС не могут быть формально сведены друг к другу. Если в процессе определения расчетных нагрузок силовых элементов СЭС необходимо исходить из максимально допустимых температур нагрева этих элементов, то, определяя запасы их пропускной способности, необходимо учитывать также другие условия их эксплуатации.

Постановка задачи

В процессе эксплуатации систем электроснабжения может возникнуть необходимость в определении величины дополнительной нагрузки, которую способен нести существующий элемент СЭС. Для существующих внешних линий питания и распределительных сетей потребителей электроэнергии такая необходимость может возникнуть в связи с расширением производства, модернизацией технологических процессов, подключением новых потребителей электроэнергии и по другим причинам. В этих случаях оценку запасов пропускной способности линий электропередач выполняют, как правило, по допустимым токам, регламентированным ПУЭ [7], используя понятие запаса пропускной способности по аналогии к понятию расчетной нагрузки. Такая оценка дает возможность обеспечить допустимость нагрева элемента СЭС в случае увеличения его нагрузки в пределах найденного запаса пропускной способности. Однако допустимость режима работы элемента СЭС определяется не только условием допустимого нагревания этого элемента в нормальном режиме работы. На его пропускную способность влияет также его нагрев в послеаварийном режиме с учетом допустимой перегрузки и мощности потребления в этом режиме, потеря напряжения в нормальном и послеаварийном режимах работы и другие условия. Результаты исследований, выполненных авторами, показали, что учет этих условий может привести к существенным ошибкам в оценке запасов пропускной способности элементов СЭС.

Из вышеизложенного вытекает, что интуитивное понимание запаса пропускной способности (ЗПС) элемента СЭС требует уточнения. Далее приведено формальное определение этого понятия, а также предлагаются математическая и компьютерная модели определения величины запаса пропускной способности кабельной линии по экспериментальным данным о режиме ее работы. Показано, что в процессе определения ЗПС на основе этих моделей целесообразно использовать методы решения задач линейного программирования, но общий алгоритм решения задачи должен быть дополнен в связи со специфическими особенностями поставленной задачи.

Основные результаты

Дальше под запасом пропускной способности элемента СЭС авторы предлагают понимать максимально возможное значение полной мощности S_3 , которую дополнительно способен нести этот элемент при условии выполнения всех ограничений, которые определяют допустимость условий его эксплуатации.

Рассмотрим особенности задачи определения запаса пропускной способности кабельной линии (КЛ). Анализ показывает, что выполнение большинства условий допустимой эксплуатации разных элементов СЭС непосредственно зависит от величины S_3 . Но существуют также условия, выполнение которых не зависит от этой величины. Несмотря на это, такие условия также должны учитываться в процессе определения запаса пропускной способности элементов СЭС. Например, очевидно, что увеличение нагрузки КЛ влияет на выполнение условия допустимого ее нагрева, но оно может никак не повлиять на выполнение условия допустимого кратковременного нагрева этой линии током короткого замыкания (ТКЗ), если величина ТКЗ в начале линии останется неизменной. Соответствующие условия можно записать в виде:

$$k_{don} \cdot I_{don}(F) \geq I_p + \frac{S_3}{\sqrt{3} \cdot U}, \quad (1)$$

$$F \geq F_{кз} = \frac{I_{кз} \cdot \sqrt{t_n}}{C}, \quad (2)$$

где $k_{доп} = k_c \cdot k_n$ – коэффициент допустимой нагрузки (уточняет значение допустимого тока для конкретных условий эксплуатации линии); k_c , k_n – коэффициенты среды и прокладки соответственно (учитывают отличие параметров среды и условий прокладки линии от принятых в ПУЭ [1] при составлении таблиц допустимых токов); $I_{доп}(F)$ – допустимый ток КЛ сечением F согласно ПУЭ; I_p – расчетный ток КЛ, который соответствует существующей нагрузке этой линии; U – напряжение сети; $F_{кз}$ – минимальное сечение линии по условию термического действия Т.К.З. (определяется с помощью нормативных методов расчета термического действия Т.К.З.); $I_{кз}$, t_n – ток и приведенное время короткого замыкания в начале КЛ; C – нормированный параметр, значение которого зависит от марки КЛ.

Условие (1) записано для случая равенства коэффициентов мощности существующей расчетной нагрузки линии и дополнительной ее нагрузки S_3 . Именно при этих условиях дополнительная нагрузка S_3 вызовет максимальное увеличение действующего значения тока, а, соответственно, и температуры нагрева линии. Поскольку в процессе определения запаса пропускной способности параметры дополнительной нагрузки (и, в частности, ее коэффициент мощности) могут быть неизвестными, то в дальнейшем мы также будем исходить из этого наиболее неблагоприятного предположения.

Назовем условия допустимой эксплуатации элемента СЭС, выполнение которых зависит от величины S_3 , *активными* в задаче определения запаса пропускной способности этого элемента, а все остальные условия – *пассивными* в этой задаче. Очевидно условие (1) является активным, а условие (2), записанное для случая отдаленной от источника питания точки К.З., является пассивным, поскольку в этом случае его выполнение не зависит от величины S_3 .

Требую выполнения всех условий допустимой эксплуатации элемента СЭС в определении величины S_3 , авторы исходили из следующего. Выполнение пассивных условий согласно их определения не зависит от величины S_3 . Поэтому, если хотя бы одно пассивное условие не выполняется, то это означает, что соответствующий элемент СЭС работает в недопустимых условиях даже без увеличения его нагрузки и подлежит замене. Если при таких условиях мы найдем запас его пропускной способности, учитывая лишь активные условия задачи, и окажется, что $S_3 > 0$, то это может ввести в заблуждение лицо, которое будет принимать решение касательно допустимости работы этого элемента после увеличения его нагрузки. Ведь, увеличивая нагрузку элемента СЭС на величину $\Delta S \leq S_3$, мы ухудшаем условия его эксплуатации, но нагрузка элемента остается допустимой. Если же существующие условия работы элемента СЭС допустимо даже ухудшить, то логично считать, что до ухудшения они тоже были допустимыми. Но это не так, поскольку одно из пассивных условий, как это было принято, было и останется недопустимым. Чтобы избежать подобной ситуации, предлагается в процессе определения запаса пропускной способности проверять как активные, так и пассивные условия, а в случае невыполнения хотя бы одного пассивного условия считать, что $S_3 = 0$.

С учетом сказанного математическая модель определения запаса пропускной способности КЛ будет иметь вид:

$$f(S_3) = S_3 \rightarrow \max_{S_3}, \quad (3)$$

$$k_{доп} \cdot I_{доп}(F) \geq I_p + \frac{S_3}{\sqrt{3} \cdot U}, \quad (4)$$

$$k_{на} \cdot k_{доп} \cdot I_{доп}(F) \geq k_{зна} \cdot k_{нна} \cdot \left(I_p + \frac{S_3}{\sqrt{3} \cdot U} \right), \quad (5)$$

$$\frac{r_0(F) \cdot (P_p + S_3 \cdot \cos(\varphi)) + x_0(F) \cdot (Q_p + S_3 \cdot \sin(\varphi))}{10 \cdot U^2} \cdot L \leq \Delta U_{\text{ндоп}}, \quad (6)$$

$$\frac{r_0(F) \cdot (P_p + S_3 \cdot \cos(\varphi)) + x_0(F) \cdot (Q_p + S_3 \cdot \sin(\varphi))}{10 \cdot U^2} \cdot L \cdot k_{\text{зна}} \cdot k_{\text{нна}} \leq \Delta U_{\text{падоп}}, \quad (7)$$

$$F \geq \frac{I_{\text{КЗ}} \cdot \sqrt{t_n}}{C}, \quad (8)$$

где $k_{\text{па}}$ – коэффициент максимально допустимой перегрузки КЛ в послеаварийном режиме согласно ПУЭ; $k_{\text{зна}}$ – коэффициент увеличения нагрузки в послеаварийном режиме работы КЛ (показывает во сколько раз увеличивается нагрузка в послеаварийном режиме работы КЛ); $k_{\text{нна}}$ – часть общей нагрузки, которая должна потребляться в послеаварийном режиме работы КЛ; P_p , Q_p – соответственно активная и реактивная расчетные мощности КЛ; $\cos(\varphi)$ – коэффициент мощности; $r_0(F)$, $x_0(F)$ – соответственно удельные активное и реактивное сопротивление линии сечением F ; $\Delta U_{\text{ндоп}}$, $\Delta U_{\text{падоп}}$ – допустимые потери напряжения в КЛ в нормальном и послеаварийном режимах работы линии соответственно.

Как видим, особенностью полученной математической модели является наличие в ней не только активных условий (4) – (7), но и пассивного условия (8). Если отбросить пассивное условие, то мы получим обычную задачу линейного программирования, в которой показателем эффективности является диагональная функция $f(S_3)$, управляемой переменной – величина S_3 , а условия (4) – (7) играют роль ограничений на управляемую переменную.

Выполненный авторами анализ задач определения запасов пропускной способности других силовых элементов СЭС показал, что количество пассивных условий может быть большим.

Поскольку выполнение пассивных условий не зависит от искомой величины, то для решения поставленной задачи целесообразно сначала проверить выполнение всех имеющихся пассивных условий (в данном случае условия (8)). Если хотя бы одно пассивное условие не выполняется, то поиск величины S_3 теряет смысл. В этом случае необходимо принять $S_3 = 0$.

Если же все пассивные условия выполняются, то для определения величины S_3 необходимо решить задачу (3) – (7), используя известные методы линейного программирования.

Другой особенностью этой задачи является то, что, как видно из математической модели (3) – (8), для ее решения необходимо знать существующие значения расчетного тока и коэффициента мощности КЛ. Но измерить эти величины непосредственно невозможно, так как реальная нагрузка кабельной линии изменяется во времени, а расчетный ток согласно [6] является условно неизменной величиной, эквивалентной по максимальной температуре ее нагрева.

Нормативный документ [6] регламентирует определение расчетных нагрузок элементов систем электроснабжения на стадии их проектирования. В работе [8] авторами было показано, что использовать нормативные методы прогнозирования расчетных нагрузок в процессе эксплуатации СЭС нецелесообразно. В этой работе авторы предложили математические и компьютерные модели определения существующих расчетных нагрузок в действующих системах электроснабжения по экспериментальным данным, полученным с помощью электронного счетчика электроэнергии за период времени не меньший длительности максимально загруженной смены работы потребителя электроэнергии. При этом учитывается постоянная нагревания элемента СЭС, по которому передается эта нагрузка. Используя эти модели, можно найти расчетный ток и коэффициент мощности для любого элемента СЭС по результатам дискретных данных измерений активной и реактивной мощности с заданным периодом интеграции электронного счетчика.

На рисунке 1 показана компьютерная модель определения запаса пропускной способности

кабельной линии по полученным таким образом параметрам I_p и $\cos(\varphi)$ для одной из КЛ 10 кВ Севериновского кирпичного завода.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Визначення запасу пропускної здатності КЛ										
2	Параметри КЛ										
3	Переріз КЛ, мм^2									Fкл = 50	
4	Активний питомий опір КЛ, Ом/км									Ro = 0,62	
5	Реактивний питомий опір КЛ, Ом/км									Xo = 0,09	
6	Допустимий струм КЛ за ПУЕ, А									Idоп = 140	
7	Довжина лінії, км									L = 3,1	
8	Дані нормального режиму										
9	Напруга, кВ									U = 10	
10	Повна розрахункова потужність, кВА									Sp = 1050,0	
11	Розрахунковий струм КЛ, А									Ip = 60,6	
12	Коефіцієнт потужності									CosF = 0,88	
13	Активна розрахункова потужність, кВт									Pp = 924,0	
14	Реактивна розрахункова потужність, квар									Qp = 498,7	
15	Коефіцієнт допустимого навантаження									Kдоп = 0,9	
16	Допустима втрата напруги в КЛ, %									dУдоп = 5	
17	Дані аварійного режиму										
18	Струм к.з. на початку лінії, кА									Ikз = 3,200	
19	Приведений час к.з., с									tn = 1,5	
20	Тепловий коефіцієнт C, (A*c^(1/2))/мм^2									C = 90	
21	Мінімальний переріз лінії за умовою к.з, мм^2									Fкз = 43,55	
22	Дані післяаварійного режиму										
23	Коефіцієнт збільшення навантаження в п.а. режимі									Kзпа = 1,9	
24	Макс. допустимий коефіцієнт навантаження в п.а. режимі									Kпа = 1,1	
25	Частка навантаження у п.а. режимі									Kнпа = 0,8	
26	Допустима втрата напруги в КЛ, %									dУпадоп = 5	
27	Запас пропускної здатності, кВА, кВт, квар, А:										
28	Sz = 529,4			Pз = 465,8			Qз = 251,4			Iз = 30,6	
29											
30	Виконання обмежень										
31	Активні обмеження										
32	Ip + Iz ≤ Kдоп*Iдоп							Допустимість нагрівання в н.р.			
33	91,18 ≤ 126							ДОП.			
34	Kз*(Ip+Iз)*кнпа) ≤ Kпа*Kдоп*Iдоп							Допустимість нагрівання в п.а.р.			
35	138,60 ≤ 138,60							v ДОП.			
36	dUn% ≤ dУдоп							Допустимість втрат напруги в н.р.			
37	2,88 ≤ 5							ДОП.			
38	dUna% ≤ dУпадоп							Допустимість втрат напруги в п.а.р.			
39	4,38 ≤ 5							ДОП.			
40	Пасивні обмеження										
41	Fкз ≤ Fкл							Допустимість термічної дії С.К.З.			
42	43,5 ≤ 50							ДОП.			
43	Точність фіксації обмежень: 0,50%										

Рис. 1. Компьютерная модель определения запаса пропускной способности КЛ

Компьютерная модель создана на рабочем листе электронного процессора Excel в виде электронной таблицы и содержит исходные данные и результаты расчета, полученные с помощью встроенного в Excel средства "Поиск решения" с использованием метода линейного программирования, реализованного в этом средстве. В ячейках электронной таблицы также

используются формулы, показанные в таблице 1. Для удобства анализа результатов решения задачи в столбце G автоматически фиксируются условия, которые ограничили значение параметра S_3 . Точность фиксации ограничений задается в ячейке K43.

Если КЛ не удовлетворяет пассивному ограничению, или хотя бы одному активному ограничению при $S_3 = 0$, то в ячейке B29 автоматически появляется сообщение: “Существующее сечение КЛ НЕ удовлетворяет ограничениям. $S_3 = 0$!”.

Таблица 1.

Формулы электронной таблицы компьютерной модели определения запаса пропускной способности КЛ

Комірки	Формули робочого листа Excel
K11	=Sp/КОРЕНЬ(3)/U
K13	=Sp*cosF
K14	=Sp*SIN(ACOS(CosF))
K21	=Ikз*КОРЕНЬ(tn)*1000/C
F28	=S3*cosF
I28	=S3*SIN(ACOS(CosF))
K28	=S3/КОРЕНЬ(3)/U
B29	=ЕСЛИ(И(Н33="ДОП."; Н35="ДОП."; Н37="ДОП."; Н39="ДОП."; Н42="ДОП."); "";"Існуючий переріз КЛ НЕ задовольняє обмеженням. S3 = 0!")
C33	Ip+Iз
E33	= ЕСЛИ(ИЛИ(Кдоп = ""; Ідоп = ""); "";"Кдоп*Ідоп")
Н33	=ЕСЛИ(С33 <= Е33 + С33*0,00001; "ДОП."; "НЕ ДОП.")
С35	=ЕСЛИ(Кз > 1; Кз*(Ip+Iз)*кппа; 0)
E35	= Кпа*Кдоп*Ідоп
Н35	=ЕСЛИ(С33 <= Е33 + С33*\$K\$43; "ДОП."; "НЕ ДОП.")
С37	=ЕСЛИ(U = ""; "";"(Ro*(Pr+Pз)+Xo*(Qp+Qз))*L/10/U^2)
E37	=dUндоп
Н37	=ЕСЛИ(С35 <= Е35 + С35*\$K\$43; "ДОП."; "НЕ ДОП.")
С39	= ЕСЛИ(Кз > 1; dUn*Кз*кппа; 0)
E39	=dUпадоп
Н39	=ЕСЛИ(С39 <= Е39 + С39*\$K\$43; "ДОП."; "НЕ ДОП.")
С42	=Fкз
E42	=Fкл
Н42	=ЕСЛИ(С42 <= Е42 + С42*\$K\$43; "ДОП."; "НЕ ДОП.")
G33	=ЕСЛИ(И(С33 <= Е33 + С33*\$K\$43; С33 >= Е33 - С33*\$K\$43); "v"; "")
G35	=ЕСЛИ(И(С35 <= Е35 + С35*\$K\$43; С35 >= Е35 - С35*\$K\$43); "v"; "")
G37	=ЕСЛИ(И(С37 <= Е37 + С37*\$K\$43; С37 >= Е37 - С37*\$K\$43); "v"; "")
G39	=ЕСЛИ(И(С39 <= Е39 + С39*\$K\$43; С39 >= Е39 - С39*\$K\$43); "v"; "")
G42	=ЕСЛИ(И(С42 <= Е42 + С42*\$K\$43; С42 >= Е42 - С42*\$K\$43); "v"; "")

Выводы

В работе формализовано понятие запаса пропускной способности силового элемента системы электроснабжения с учетом всех условий допустимой эксплуатации этого элемента. Предложено математическую и компьютерную модели процессов определения запаса пропускной способности кабельных линий, пригодные к использованию в условиях расширения производства, модернизации технологических процессов и подключения новых потребителей электроэнергии к существующей электросети. Работоспособность предложенных моделей проверена на реальных данных существующей системы электроснабжения при решении вопроса о допустимости подключения дополнительных нагрузок к существующей КЛ 10 кВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Временные руководящие указания по определению электрических нагрузок промышленных предприятий. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 27 с.
2. Погребняк Н. Н. Совершенствование методов определения расчетных нагрузок по нагреву / Н. Н. Погребняк // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 5-Донецк: Наукові праці ВНТУ, 2011, № 2

ДонГТУ. – 2000. – С. 146 – 149.

3. Совершенствование методов расчета электрических нагрузок [Электронный ресурс] / Куренный Э. Г., Дмитриева Е. Н., Погребняк Н. Н., Башков В. М. –

Режим доступа: http://masters.donntu.edu.ua/2006/eltf/belyaev/library/ist_2.htm.

4. Нестеренко И. С. Методы расчета нагрузок промышленных электрических сетей / И. С. Нестеренко // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 11. – Донецк: ДонГТУ. – 2006. – С. 521 – 527.

5. Кудрин Б. И. Электроснабжение, инвестиционное проектирование и закрытие проблемы расчёта электрических нагрузок / Б. И. Кудрин, С. А. Цырук. // Электрика. – 2006. – № 4. – С. 3 – 11.

6. Инструктивные и информативные материалы по проектированию электротехнических промышленных установок. Указания по расчету электрических нагрузок: РТМ 36.18.32.4-92. – [Чинний з 01.01.93]. – М.: ВНИПИ Тяжпромэлектропроект. – 9 с.

7. Правила устройства электроустановок. – Харьков: Изд-во “Форт”, 2009. – 704 с.

8. Камінський В. В. Комп'ютерні моделі визначення розрахункових навантажень за експериментальними даними / В. В. Камінський, А. В. Камінський // Вісник ВПІ. – 2010. – №1. – С. 47 – 51.

Каминский Андрей Вячеславович – к. т. н., доцент кафедры моделирования и мониторинга сложных систем.

Каминский Вячеслав Викторович – к. т. н., доцент кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента.

Винницкий национальный технический университет.