

УДК 621.311

РАСЧЕТ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ МЕТОДОМ НЬЮТОНА С УЧЕТОМ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Мензлеев А. С.

Научный руководитель – м.т.н., старший преподаватель Волков А.А.

Характеристики нагрузки оказывают большое влияние на режимы работы энергосистем. В особенности влияние проявляется в аварийных режимах, при отклонении напряжения до величин близких к предельно допустимым. Учет характеристик повышает точность расчета установившихся режимов и определение устойчивости энергосистем. Статические характеристики нагрузки узлов энергосистем отражают зависимость совокупной нагрузки потребителей электроэнергии от напряжения. С течением времени подключаются новые потребители, претерпевает изменения нагрузка из-за ввода в эксплуатацию нового оборудования. Вследствие описанных процессов требуется периодическое уточнение статических характеристик нагрузки.

Характеристикой каждого электроприемника и потребителей в целом является потребляемая ими активная и реактивная мощность. Величина мощности потребителей зависит как от режима (порядка) их работы во времени, так и от параметров режима - напряжения на зажимах электропотребителя и частоты в электрической сети.

Зависимости, показывающие изменение активной и реактивной мощности [1]

$$P = \varphi(f, U) \text{ и } Q = \psi(f, U) \quad (1)$$

от частоты f и подведенного напряжения U при медленных изменениях этих параметров, называют статическими характеристиками нагрузки (СХН).

Для расчета данной характеристики используем метод Ньютона первого порядка. Основное достоинство метода, при сравнительно несложной вычислительной схеме, заключается в быстрой и устойчивой сходимости, что позволяет надежно определить параметры нормальных эксплуатационных, а также тяжелых и близких к предельным электрических режимов.

Статические характеристики нагрузок можно выразить аналитически в виде полиномов n -й степени. Тогда, например, СХН по напряжению можно записать в виде [1]:

$$P(U) = P_{\text{ном}} \left[\alpha_0 + \alpha_1 \frac{U}{U_{\text{ном}}} + \alpha_2 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 + \dots + \alpha_n \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^n \right] \quad (2)$$

$$Q(U) = Q_{\text{ном}} \left[\beta_0 + \beta_1 \frac{U}{U_{\text{ном}}} + \beta_2 \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 + \dots + \beta_n \left(\frac{U}{U_{\text{ном}}} \right)^n \right],$$

где $P_{\text{ном}}$, $Q_{\text{ном}}$ — активная и реактивная мощности нагрузки, соответствующие номинальному напряжению или данным контрольного

замера, соответствующего номинальному режиму узла нагрузки; U - текущее значение напряжения; α, β - коэффициенты аппроксимирующих полиномов.

С достаточной для практических расчетов точностью СХН отражаются полиномами второй степени [1]:

$$P(U) \approx P_{\text{ном}}(\alpha_0 + \alpha_1 U + \alpha_2 U^2) \quad (3)$$

$$Q(U) \approx Q_{\text{ном}}(\beta_0 + \beta_1 U + \beta_2 U^2)$$

где $U = U/U_{\text{ном}}$ — текущее относительное значение напряжения.

Значения коэффициентов для любых СХН удовлетворяют условию [1]:

$$\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 = 1 \text{ и } \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 = 1 \quad (4)$$

При отсутствии достоверной информации об СХН узла ЭС, используются обобщенные типовые коэффициенты, различающиеся в зависимости от класса напряжения и характера моделируемой нагрузки.

Выполним расчет режима электрической сети, представленной на рисунке 1. Напряжение в балансирующем узле 120 кВ.

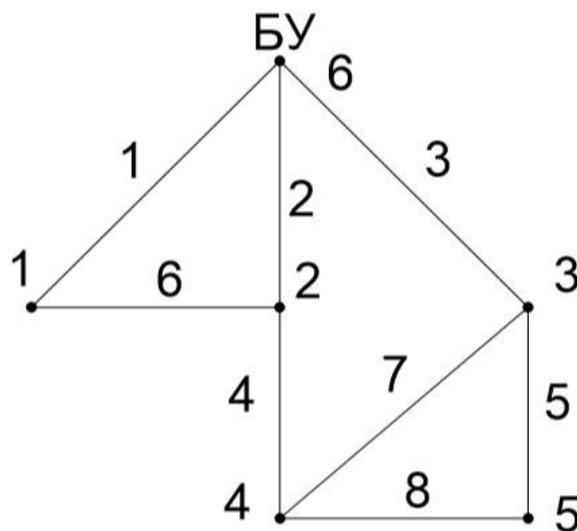


Рисунок 3 - Схема электрической сети

Реализация метода Ньютона в программе Mathcad представлена ниже. Полную мощность S нагрузочных узлов заменяем статическими характеристиками.

При записи метода Ньютона приняты следующие обозначения: P_n, Q_n - активная и реактивная мощности, соответствующие номинальному напряжению, U_0 - матрица напряжений, $U_{\text{ном}}$ - номинальное напряжение сети, U_{bu} - напряжение на балансирующем узле, Y_u - матрица узловых проводимостей без балансирующего узла, Y_{bu} - матрица узловой проводимости балансирующего узла.

```

Un := while 1
    for i ∈ 1..5
        Sti ← [ Pni · [ 0.83 - 0.3 ·  $\frac{|U_{0,i,k+1}|}{U_{nom}}$  + 0.47 ·  $\left(\frac{|U_{0,i,k+1}|}{U_{nom}}\right)^2$  ] + j · Qni · [ 3.7 - 7 ·  $\frac{|U_{0,i,k+1}|}{U_{nom}}$  + 4.3 ·  $\left(\frac{|U_{0,i,k+1}|}{U_{nom}}\right)^2$  ] ] if Pni < 0
        Sti ← Sni otherwise
        Wi,k+1 ←  $\sum_{j=1}^5 (Y_{y_{i,j}} \cdot U_{0,j,k+1}) - \frac{\overline{St}_i}{U_{0,i,k+1}} - U_{bu} \cdot Y_{bu_{1,i}}$ 
        V ← Yy + diag [  $\frac{\overline{St}}{(U_{0}^{<k+1>})^2}$  ]
        U0<k+2> ← U0<k+1> - (V-1) · W<k+1>
        break if |U0<k+2> - U0<k+1>| < 0.001
        k ← k + 1
    U0
    
```

На одиннадцатой итерации получили следующие значения напряжений в узлах.

$$U_n^{<11>} = \begin{pmatrix} 114.806 - 3.923i \\ 116.751 - 2.464i \\ 114.013 - 2.445i \\ 110.273 - 5.836i \\ 106.346 - 7.888i \end{pmatrix} \quad \left| U_n^{<11>} \right| = \begin{pmatrix} 114.873 \\ 116.777 \\ 114.04 \\ 110.427 \\ 106.639 \end{pmatrix}$$

Как видно расчет напряжения MathCad и RASTR различается на 0,02кВ, причиной этого является то, что мы использовали в методе Ньютона в качестве критерия окончания итерационного процесса разность модулей напряжений на соседних итерациях. Программа RASTR в качестве критерия окончания итерационного процесса использует небаланс мощностей в узлах, что является более правильным.

Сравним расчет режима электрической сети без учета СХН (рисунок 2) и с учетом СХН (рисунок 3) с помощью программы RASTR.

	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N...	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_зд	Q_min	Q_max	V_ш	V	Delta	Тер...
1	<input type="checkbox"/>		Нагр	1		110			34,0	12,3							115,06	-1,93	
2	<input type="checkbox"/>		Нагр	2		110											116,80	-1,20	
3	<input type="checkbox"/>		Нагр	3		110					34,0	22,8					113,88	-1,22	
4	<input type="checkbox"/>		Нагр	4		110			29,0	14,0							110,27	-3,04	
5	<input type="checkbox"/>		Нагр	5		110			59,0	28,6							106,26	-4,27	
6	<input type="checkbox"/>		База	6		120					94,0	42,7					120,00		

Рисунок 2 - Расчет режима электрической сети без учета СХН

	O	S	Тип	Номер	Название	U_ном	N_схн	Район	P_н	Q_н	P_г	Q_г	V_ш	V	Delta	Pн_расч	Pг_расч	Qн_расч	Qг
1	<input type="checkbox"/>		Нагр	1		110	1		34,0	12,3				114,89	-1,96	35		13	
2	<input type="checkbox"/>		Нагр	2		110								116,79	-1,21				
3	<input type="checkbox"/>		Нагр	3		110					34,0	22,8		114,06	-1,23		34		23
4	<input type="checkbox"/>		Нагр	4		110	1		29,0	14,0				110,45	-3,03	29		14	
5	<input type="checkbox"/>		Нагр	5		110	1		59,0	28,6				106,66	-4,24	58		27	
6	<input type="checkbox"/>		База	6		120					94,0	42,5		120,00			94		43

Рисунок 3 - Расчет режима электрической сети с учетом СХН

В MathCad с помощью метода Ньютона итерационный процесс сошелся на одиннадцатой итерации, без использования СХН – на девятой итерации.

Литература

1. Передача и распределение электрической энергии: Учебное пособие/ А. А. Герасименко, В. Т. Федин. - Ростов-н/Д.: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006. - 720 с.
2. Оценка точности статических характеристик нагрузки, полученных экспериментальным путём: Магистерская диссертация/ Копылов И.Е – Томск; Национальный Исследовательский Томский Политехнический Институт, 2016.