

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ ОТ ПОНИЖЕНИЯ НАПЯЖЕНИЯ

НЕБОЛЮБОВ Ю. Е.

Доцент, кандидат технических наук

Общие соображения

В настоящее время отсутствует обоснованный выбор установок напряжения трогания защиты от понижения напряжения. Почти во всех случаях напряжение трогания реле этой схемы защиты принимается равным 60—80% от номинального напряжения сети. Попытка разработать методику обоснованного определения напряжения трогания защиты минимального напряжения представляет известную ценность.

Устойчивая работа синхронных компенсаторов в системе характеризуется величиной предельного напряжения ($U_{пр.}$).

Если во время аварии напряжение будет меньше этой величины, то компенсатор выпадет из синхронизма. Вот эту величину $U_{пр.}$ и следует положить в основу выбора напряжения трогания рассматриваемой защиты.

Выражения предельного напряжения для различных случаев нагрузки даны в статье Лебедева и Жданова¹⁾.

Для асинхронной нагрузки, характеризующейся постоянством активной мощности от напряжения, предельное напряжение находится на основании схемы замещения, рис. 1.

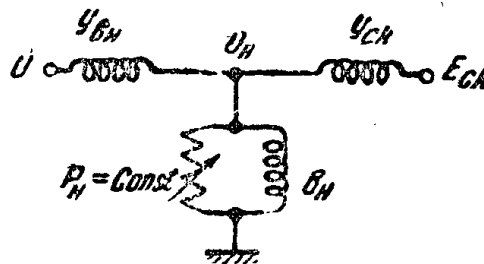


Рис. 1

Остановимся несколько подробнее на этом выводе. Если объединить ветви синхронного компенсатора и внешней цепи и ввести эквивалентную электродвижущую силу $E_э$, то можно написать следующие выражения: эквивалентная проводимость

$$y_э = y_{вн} + y_{ск}; \quad (1)$$

эквивалентная электродвижущая сила

$$E_э = \frac{E_{ск} y_{ск} + U y_{вн}}{y_э}; \quad (2)$$

активная мощность

$$P = E_э U_н y_э \sin \delta; \quad (3)$$

реактивная мощность

$$Q = U_н^2 b_н = E_э U_н y_э \cos \delta - U_н^2 y_э. \quad (4)$$

¹⁾ Лебедев и Жданов. Устойчивость параллельной работы синхронных компенсаторов. Бюллетень ВЭИ № 5, 1941.

В уравнениях (3) и (4) δ представляет угол между эквивалентной электродвижущей силой E_3 и электродвижущей силой синхронного компенсатора $E_{ск}$.

Активная мощность компенсатора примерно равна нулю, и $E_{ск}$ совпадает по фазе с номинальным напряжением нагрузки (U_n).

Получив из уравнения (4) величину U_n и подставив его в уравнение (3), определяем

$$E_3 = \frac{A}{\sqrt{\sin\delta \cos\delta}}, \quad (5)$$

где

$$A = \frac{\sqrt{P_n(y_3 + b_n)}}{y_3}.$$

Разлагая E_3 на ортогональные оси координат, получим

$$E_{3x} = E_3 \cos \delta = \frac{A}{\sqrt{\operatorname{tg} \delta}};$$

$$E_{3y} = E_3 \sin \delta = A \sqrt{\operatorname{tg} \delta}.$$

Отсюда

$$\frac{E_{3x}}{A} \cdot \frac{E_{3y}}{A} = 1. \quad (6)$$

Уравнение (6) представляет собою гиперболу, отнесенную к своим асимптотам. Вместе с тем из уравнения (2) имеем

$$\frac{E_3}{A} = E_{ск} \frac{y_c}{A y_3} + U \frac{y_{вн}}{A y_3} = C E_{ск} + B U. \quad (7)$$

По уравнению (7) можно построить окружность с координатой центра и радиусом-вектором $B U$ (рис. 2).

Точки возможной работы компенсатора определяются пересечением окружности и гиперболы. Точка, соответствующая меньшему углу δ ,

характеризует устойчивую работу; точка с большим углом соответствует неустойчивой работе. В случае уменьшения напряжения обе точки сближаются и, наконец, сливаются в одну точку касания кривых, что соответствует предельным условиям устойчивой работы. Если напряжение снизится еще больше, то кривые не будут пересекаться и нормальная работа становится невозможной. Условия касания

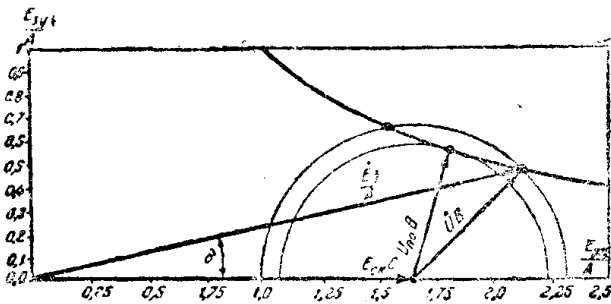


Рис. 2

кривых позволяют вывести выражения для определения величины $B U_{пр}$:

$$B U_{пр} = y_1 \sqrt{1 + y_1^4}; \quad C E_{ск} = \frac{1 - y_1^4}{y_1},$$

где

$$y_1 = \frac{E_{3y}}{A}.$$

Давая различные значения для u_1 , можно построить зависимость $U_{пр} B$ от $E_{ск} C$ (рис. 3), которая позволяет определять предельное напряжение в конкретных электрических системах. Для этого достаточно составить схему замещения системы и определить величины B и C :

$$B = \frac{y_{вн}}{\sqrt{P_n(b_n + y_э)}}; C = \frac{y_{ск}}{\sqrt{P_n(b_n + y_э)}}, \quad (8)$$

где P_n — активная составляющая мощности нагрузки; b_n — реактивная составляющая нагрузочной проводимости; $y_э$ — эквивалентная проводимость; $y_{вн}$ и $y_{ск}$ — внешняя проводимость и проводимость компенсатора. Значение величины $CE_{ск}$ позволяет по кривой рис. 3 определить $B U_{пр}$. Предельное напряжение $U_{пр}$ находится делением $B U_{пр}$ на B .

Расчет, определяющий предельное напряжение, ведется для двух случаев:

1) при постоянстве э.д.с. за переходным реактансом (принимается переходный реактанс компенсатора);

2) при постоянстве э.д.с. холостого хода (учитывается синхронный реактанс).

Компенсатор выпадет из синхронизма в первом же цикле колебания если аварийное напряжение будет меньше значения, полученного для

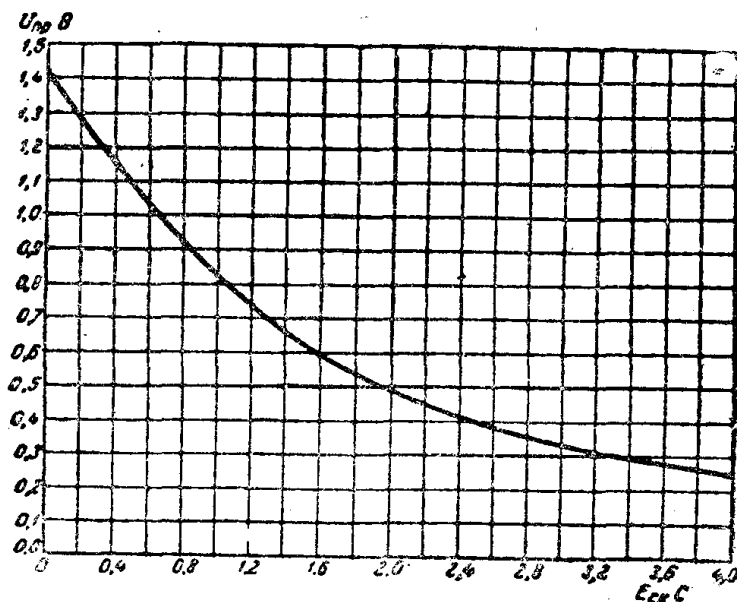


Рис. 3

первого случая расчета. Когда аварийное напряжение располагается между обоими получаемыми значениями, компенсатор выпадет из синхронизма в последующих циклах колебания. Время колебания может измеряться несколькими секундами (рис. 4).

Основываясь на рассматриваемых соотношениях, можно высказать некоторые общие соображения по поводу выбора установки защиты минимального напряжения, которые должны быть проверены эксплуатационной практикой. Напряжение трогания этой защиты следует принимать равным значению предельного напряжения, полученного расчетом максимального режима системы с учетом переходного реактанса компенсатора.

Если аварийное напряжение больше предельного, то компенсатор получит возможность втянуться в синхронизм без отключения от сети (непосредственная синхронизация).

В случае отказа в действии защиты минимального напряжения компенсатор выпадет из синхронизма и будет отключен с некоторой выдержкой времени защитой от потери синхронизма. Тем самым обеспечивается взаимное резервирование и селективность этих двух защит.

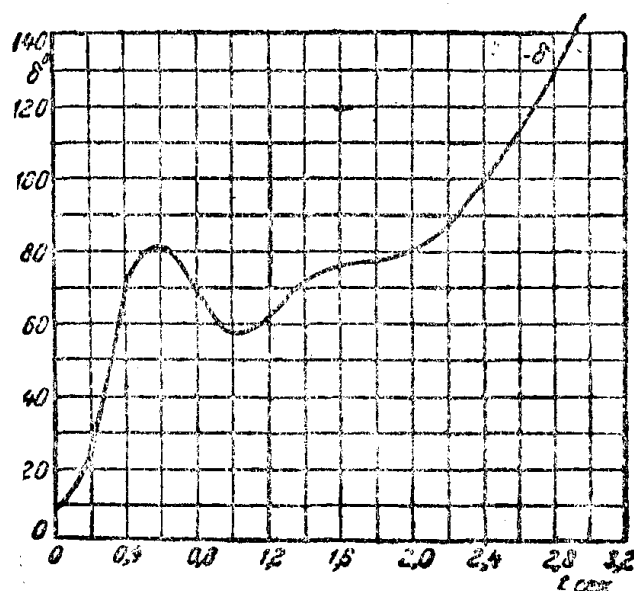


Рис. 4

Пример определения напряжения трогания защиты минимального напряжения для конкретной системы

Определим напряжение трогания для защиты компенсатора, работающего в системе, схема замещения которой в импедансах и проводимостях показана на рис. 5.

Распределение мощностей в системе и электродвижущих сил определено обычным электрическим расчетом, который здесь не приводится.

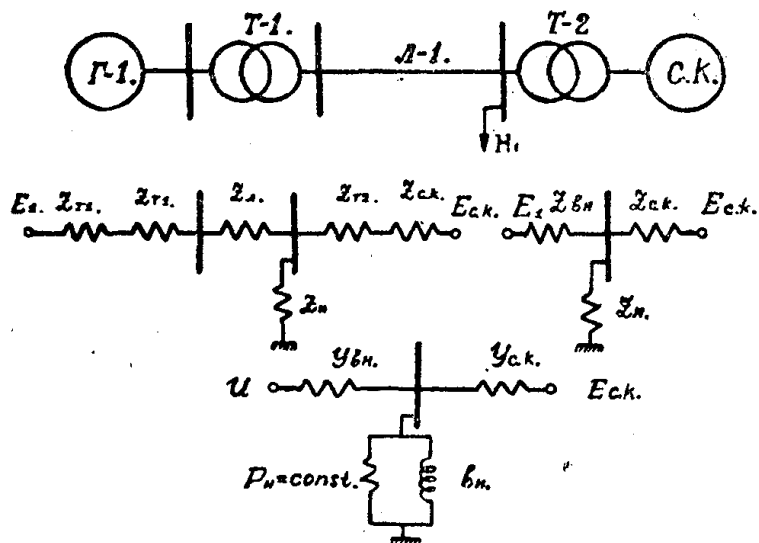


Рис. 5

Активные проводимости машин в расчете не учитываются. Все импедансы приведены к базисным условиям (суммарная мощность генераторов $P_6 = 125$ мва и напряжение $U_6 = 110$ кв). Приведенные значения импедан-

пев генераторов, трансформаторов и компенсатора подсчитаны по формуле

$$Z_{ед} = \frac{Z\% \cdot P_{баз}}{100 \cdot P_{ном}}$$

Импеданцы линий и нагрузки определены по формулам:

$$Z_{лб} = \frac{P_B}{U_B^2} (r_l + jx_l) \text{ и } Z_{нб} = \frac{U_n^2}{W_n^1} (\cos \varphi + j \sin \varphi).$$

Постоянные системы
Генераторы и синхронный компенсатор

№№ п. п.	Обозначен. на схеме	Количе- ство	Мощность		cos φ	Синхронный реактанс		Переходный реактанс	
			мва	ед.		ед.	Привед. знач.	ед.	Привед. знач.
1	Г-1	2	62,5	0,5	0,9	1,15	2,3	0,3	0,602
2	С. К.	1	15	0,12		1,8	15	0,4	3,33

Трансформаторы

№№ п. п.	Обознач. по схеме	Коли- чество	Напряжение	Мощность		Реактанс	
				мва	ед.	ед.	Привед. значен.
1	Т-1	4	10,5/110	31,5	0,252	0,105	0,417
2	Т-3	1	10,5/110	15	0,12	0,105	0,875

Линия

№№ п. п.	Обознач. по схеме	Длина (км)	Марка проводов	Число цепей	Реактивное сопротивление			Активное сопротивление		
					На 1 км	На всю длину	Прив. знач.	На 1 км	На всю длину	Прив. знач.
1	Л-1	40	АС-150	2	0,416	8,3	0,085	0,21	4,15	0,042

Нагрузка

№№ п. п.	Обозначение по схеме	Мощность			Импеданс нагрузки (приведен. значен.)
		мва	ед.	cos φ	
1	Н-1	114	0,91	0,91	0,862 + j0,126

а) Расчет с учетом переходного реактанса компенсатора.

Схема замещения системы в проводимостях для асинхронной нагрузки показана на рис. 5. На основании этой схемы определяем значения В и С по формулам (8)

Предварительно подсчитаем:

$$y_{\Sigma} = y_{вн} + y_{ск} = 2,04 + 0,238 = 2,278.$$

$$b_n = \frac{Q_n}{U_n^2} = \frac{0,120}{0,953^2} = \frac{0,126}{0,91} = 0,139.$$

$$P'_{нб} = \frac{P_n}{P_6} = \frac{114}{125} = 0,91.$$

$$B = \frac{y_{вн}}{\sqrt{P'_{нб} (b_{вн} + y_{\Sigma})}} = \frac{2,04}{\sqrt{0,91 (0,139 + 2,278)}} = 1,38.$$

$$C = \frac{y_{ск}}{\sqrt{P'_{нб} (b_n + y_{\Sigma})}} = \frac{0,238}{\sqrt{0,91 (0,139 + 2,278)}} = 0,161.$$

$E_{ск} = 1,1$ (согласно электрическому расчету).

Определяем, далее, $CE_{ск} = 0,161 \cdot 1,1 = 0,177$.

По кривой рис. 3 имеем: $B U'_{пр} = 1,2$,

отсюда
$$U'_{пр} = \frac{U_{пр} \cdot B}{B} = \frac{1,2}{1,38} = 0,87.$$

б) — Расчет с учетом синхронного реактанса компенсатора.

Основываясь на аналогичных с первым случаем расчета преобразованиях схемы замещения системы, можем определить следующие величины:

$$y_{\Sigma} = y_{вн} + y_{ск} = 2,04 + 0,063 = 2,103.$$

$$b_n = \frac{Q_n}{U_n^2} = \frac{0,126}{0,91} = 0,139.$$

$$P'_{нб} = \frac{P_n}{P_B} = \frac{114}{125} = 0,91.$$

$$B = \frac{y_{вн}}{\sqrt{P'_{нб} (b_n + y_{\Sigma})}} = \frac{2,04}{\sqrt{0,91 (0,139 + 2,103)}} = 1,43.$$

$$C = \frac{y_{ск}}{\sqrt{P'_{нб} (b_n + y_{\Sigma})}} = \frac{0,063}{\sqrt{0,91 (0,139 + 2,103)}} = 0,044.$$

Электродвижущая сила холостого хода $E_{ск} = 1,8$.

$CE_{ск} = 0,044 \cdot 1,8 = 0,08$

По значению $CE_{ск}$ и по кривой рис. 3 находим $B \cdot U_{пр}$.

$$U_{пр} = \frac{U_{пр} B}{B} = \frac{1,35}{1,43} = 0,94.$$

Напряжение трогания защиты от понижения напряжения:

$$U_{пр} = U'_{пр} = 0,86.$$

Рассмотренный числовой пример не является вполне показательным, так как дает значительную величину $U_{пр}$.

Резкое снижение $U_{пр}$ всегда возможно в системах с большим значением $y_{ск}$ и малыми величинами внешних реактансов ($x_{вн}$).