

СТОПРОЦЕНТНАЯ ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА КОРПУС

КУТЯВИН И. Д.

Доцент, кандидат технических наук

Общие соображения

Настоящая работа имеет целью исследовать возможность использования токов третьей гармоники для увеличения чувствительности защиты от замыканий на корпус для генераторов, работающих параллельно на шины генераторного напряжения.

Исследованию была подвергнута схема, указанная на рис. 1. Эта схема представляет собою схему защиты АЕГ с изолированной нулевой точкой и с созданием активного тока замыкания на землю с помощью специального заземляющего трансформатора, присоединенного на рабочих выводах генератора. На рис. 2А представлено распределение токов нулевой последовательности первой гармоники при замыкании на корпус клеммы генератора, а на рис. 2В—токов третьей гармоники при замыкании на корпус нуля генератора. Сравнение этих рисунков показывает, что использование токов третьей гармоники для увеличения чувствительности рассматриваемой защиты принципиально возможно, но мощность на клеммах реле от третьей гармоники будет ничтожно мала, так как величина напряжения третьей гармоники в составе фазового напряжения генераторов составляет 3—5%.

При этом максимальная мощность третьей гармоники составит всего 0,09—0,25% от максимальной мощности первой гармоники.

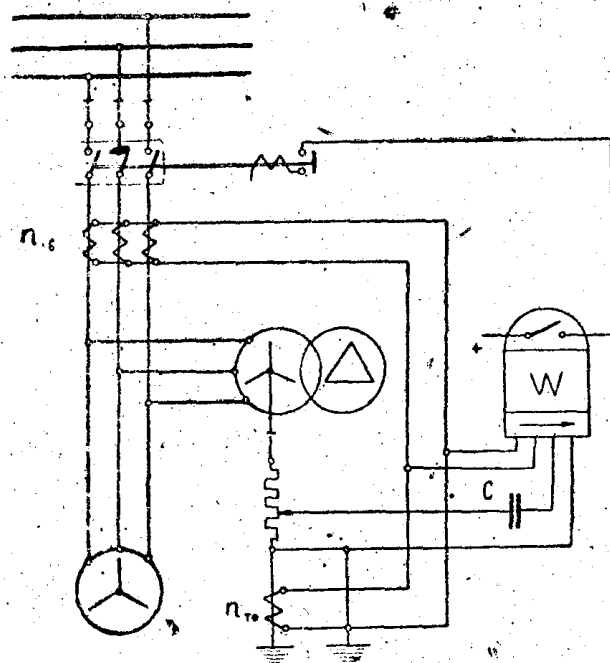


Рис. 1

Однако необходимое увеличение мощности третьей гармоники можно получить усилением напряжения этой гармоники на клеммах реле путем включения обмотки напряжения реле последовательно с емкостью С согласно рис. 1.

При этом величина необходимой емкости может быть определена из следующих условий.

1. Максимальное напряжение первой гармоники на клеммах реле $U_{рм1}$ должно быть равно номинальному напряжению реле $U_{рн}$.

2. Максимальное напряжение третьей гармоник на реле $U_{рм3}$ должно быть в k' раз больше номинального напряжения реле $U_{рн}$;

$$\frac{U_{рм3}}{k'} = U_{рм1} = U_{рн}. \quad (1)$$

3. Сдвиг токов первой и третьей гармоник в обмотке напряжения реле относительно соответствующих напряжений на клеммах должен быть одинаков и реле должно иметь достаточный крутящий момент при применении активного сопротивления заземления. Последнее условие можно

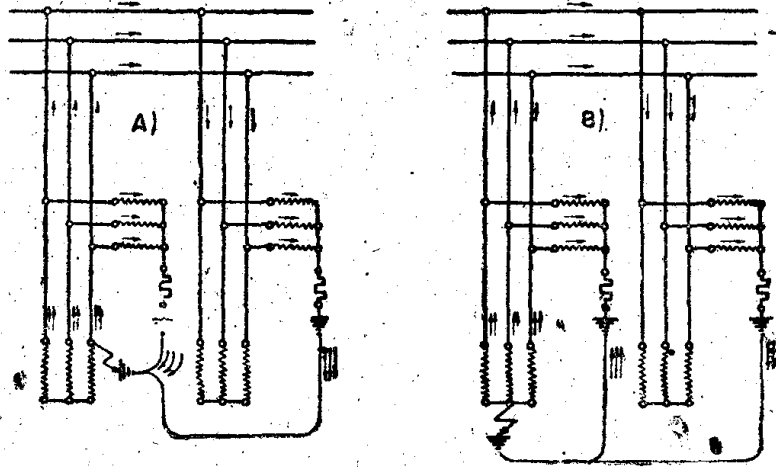


Рис. 2

выполнить, если применить в цепи напряжения реле перекомпенсацию для третьей гармоник

$$3X_p < \frac{X_c}{3};$$

предыдущее неравенство может быть представлено в следующем общем виде:

$$X_c = nX_p, \quad (2)$$

где X_c —емкостное сопротивление в цепи напряжения реле для первой гармоник и X_p —индуктивное сопротивление обмотки напряжения реле для первой гармоник.

Степень перекомпенсации должна быть такова, чтобы феррорезонанс на третьей гармонике был невозможен, и кроме того, чтобы внутренний сдвиг реле был по возможности мал. Исходя из этих условий, кратность $n \geq 12$.

На рис. 3 приведены векторные диаграммы для двух случаев.

1. На рис. 3 а дана векторная диаграмма напряжения, тока и магнитных потоков реле для первой гармоник при $X_c = 0$.

2. На рис. 3 б дана векторная диаграмма напряжения, тока и магнитных потоков для третьей гармоник при $X_c = 12 X_p$.

Сравнение этих векторных диаграмм показывает, что внутренний сдвиг реле останется почти неизменным и будет иметь лишь противоположный знак. Опыты, проведенные над реле ИМ-43, показали, что внутренний сдвиг при перекомпенсации на величину X_p увеличивается лишь на $5-7^\circ$. Эти опыты показали также, что при $n = 10$ начинает обнаруживаться явление феррорезонанса на третьей гармонике.

Далее необходимо определить степень усиления напряжения третьей гармоник, увязав между собою указанные выше три условия. Для этого

обозначим напряжение первой гармоники между точками аb на заземляющем сопротивлении (рис. 1) через U_1 , напряжение третьей гармоники через U_3 , а отношение между ними $\frac{U_3}{U_1} = k''$. Тогда напряжение первой гармоники на клеммах реле может быть определено следующим образом:

$$U_{рм1} = \frac{U_1 Z_{р1}}{\sqrt{R_p^2 + (X_p - nX_p)^2}} \quad (3)$$

а напряжение третьей гармоники на клеммах реле

$$U_{рм3} = \frac{U_3 Z_{р3}}{\sqrt{R_p^2 + \left(3X_p - \frac{n}{3}X_p\right)^2}} \quad (4)$$

где $Z_{р1}$ и $Z_{р3}$ — полные сопротивления обмотки напряжения реле первой и третьей гармоник.

R_p — активное сопротивление обмотки напряжения. Подставив в со-

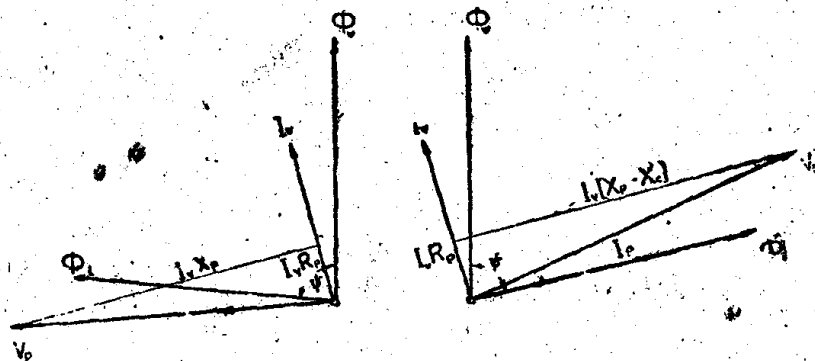


Рис. 3а

Рис. 3б

отношение (1) значение напряжения $U_{рм1}$ из (3) и $U_{рм3}$ из (4), получим следующее равенство:

$$\frac{U_1 Z_{р1}}{\sqrt{R_p^2 + (X_p - nX_p)^2}} = \frac{K'' U_1 Z_{р3}}{K' \sqrt{R_p^2 + \left(3X_p - \frac{n}{3}X_p\right)^2}}$$

или

$$\frac{Z_{р3}}{Z_{р1}} \sqrt{R_p^2 + (X_p - nX_p)^2} = \frac{K'}{K''} \sqrt{R_p^2 + \left(3X_p - \frac{n}{3}X_p\right)^2} \quad (5)$$

Выведем еще следующие обозначения:

1. Отношение сопротивлений $\frac{Z_{р3}}{Z_{р1}} = m \cong 3$;
2. Отношение коэффициентов $\frac{K'}{K''} = K$

Этот новый коэффициент K назовем коэффициентом усиления третьей гармоники, а выражение для него получим из равенства (5)

$$K = m \sqrt{\frac{1 + (n^2 - 2n) \left(\frac{X_p}{Z_{р1}}\right)^2}{1 + \left(8 - 2n + \frac{n^2}{9}\right) \left(\frac{X_p}{Z_{р1}}\right)^2}} \quad (6)$$

В числителе под знаком корня единицею по сравнению со вторым членом можно пренебречь и можно определить из этого выражения кратность напряжения третьей гармоники на клеммах реле по отношению к номинальному напряжению реле.

$$K' = mK'' \frac{X_p}{Z_{p1}} \sqrt{\frac{n^2 - 2n}{1 + \left(8 - 2n + \frac{n^2}{9}\right) \left(\frac{X_p}{Z_{p1}}\right)^2}} \quad (7)$$

Расчет защиты с учетом третьей гармоники

1. Металлическое замыкание на корпус в обмотке соседнего генератора на расстоянии от нулевой точки, равном x , в долях единицы.

1. Ложная мощность на клеммах реле от первой гармоники

$$P_{л1} = U_{p1}(I_{н1} - I_{в1}) + U_{p1}I_{нб1} = U_{pm1}(I_{nm1} - I_{vm1})x^2 + U_{pm1}I_{nb1}x,$$

или

$$P_{л1} = P_{лм1}x^2 + P_{нб1}x, \quad (8)$$

где $I_{nm1} = \frac{I_{зм}}{n_{г0}}$ — максимальный ток во вторичной цепи нулевого трансформатора,

$I_{vm1} = \frac{I_{зм}}{n_{гв}}$ — то же во вторичной цепи внешних трансформаторов тока (рис. 1).

$I_{зм}$ — максимальный первичный ток замыкания на землю, обусловленный сопротивлением заземления.

2. Ложная мощность на клеммах реле от третьей гармоники

$$P_{лз} = U_{pз}(I_{нз} - I_{вз} + I_{нбз}) = U_{pmз}(I_{nmз} - I_{vmз})(1-x)^2 + U_{pmз}I_{nbз}(1-x)$$

или

$$P_{лз} = P_{лмз}(1-x)^2 + P_{нбз}(1-x). \quad (9)$$

Отношения мощностей в уравнениях (8) и (9):

$$\frac{P_{лмз}}{P_{лм1}} = \frac{U_{pmз}}{U_{pm1}} \cdot \frac{I_{nmз} - I_{vmз}}{I_{nm1} - I_{vm1}} = K'K'',$$

$$\frac{P_{нбз}}{P_{нб1}} = \frac{U_{pmз}}{U_{pm1}} \cdot \frac{I_{нбз}}{I_{нб1}} = K'K_{нб},$$

где $K_{нб} \cong 1$ — отношение тока небаланса третьей гармоники внешних трансформаторов тока к току небаланса первой.

Учитывая это, можно составить выражения для полной ложной мощности:

$$P_{л} = P_{л1} + K_f P_{лз} = P_{лм1}x^2 + P_{нб1}x + K_f K' K'' P_{лм1}(1-x)^2 + K_f K' K_{нб} P_{нб1}(1-x).$$

Обозначим еще через $K_1 = K_f K' K''$ и $K_2 = K_f K' K_{нб}$,

где $K_f = 0,85$ — частотный коэффициент индукционных реле.

Тогда получим упрощенное выражение для полной ложной мощности

$$P_{л} = P_{лм1}[x^2 + K_1(1-x)^2] + P_{нб1}[x + K_2(1-x)]. \quad (10)$$

Для соблюдения селективности работы защиты необходимо, чтобы максимальная ложная мощность на клеммах реле была меньше мощности трогания реле:

$$P_{рт} = K_n P_{лм}, \quad (11)$$

где $K_n > 1$ — коэффициент надежности.

Для отыскания максимальной ложной мощности дифференцируем уравнение (10) по x :

$$\frac{dP_{л}}{dx} = P_{лм1}[2x - 2K_1(1-x)] + P_{нб1}(1-K_2) = 0.$$

Значение x , соответствующее максимуму ложной мощности,

$$x_m = \frac{2K_1 P_{лм1} - P_{нб1}(1-K_2)}{2P_{лм1}(1+K_1)}. \quad (12)$$

Подставляя значение x_m в уравнение (10), получим следующее выражение для максимальной ложной мощности:

$$P_{лм} = \frac{K_1 P_{лм1}^2 + P_{лм1} P_{нб1}(K_1 + K_2) - 0,25 P_{нб1}^2 (1 - K_2)^2}{P_{лм1}(1 + K_1)}. \quad (13)$$

Как будет показано ниже, практические пределы коэффициентов K_1 и K_2 таковы, что последним членом числителя выражения (13), по сравнению с другими членами, можно пренебречь.

Учитывая условие селективности (11), можно составить следующее соотношение:

$$\frac{P_{рт}}{K_n} = \frac{K_1 P_{лм1} + P_{нб1}(K_1 + K_2)}{1 + K_1}. \quad (14)$$

Из этого соотношения можно определить разность вторичных токов в цепи защиты, которая выразится в следующем виде:

$$I_{нм1} - I_{нб1} = \frac{P_{рт}(1 + K_1) - K_n P_{нб1}(K_1 + K_2)}{K_1 K_n U_{рм1}}. \quad (15)$$

Ц. Металлическое замыкание на корпус в обмотке защищаемого генератора на расстоянии от нулевой точки, равном x .

1. Мощность на клеммах реле от первой гармоники:

$$P_1 = U_{р1}(I_{н1} - I_{нб1}) = U_{рм1} I_{нм1} x^2 - U_{рм1} I_{нб1} x,$$

или

$$P_1 = P_{нм1} x^2 - P_{нб1} x. \quad (16)$$

2. Мощность на клеммах реле от третьей гармоники

$$P_3 = U_{р3}(I_{н3} - I_{нб3}) = U_{рм3} I_{нм3} (1-x)^2 - U_{рм3} I_{нб3} (1-x),$$

или

$$P_3 = P_{нм3} (1-x)^2 - P_{нб3} (1-x). \quad (17)$$

3. Полная мощность на клеммах реле

$$P_p = P_1 + K_f P_3 = P_{нм1} x^2 - P_{нб1} x + K_1 P_{нм1} (1-x)^2 - K_2 P_{нб1} (1-x),$$

или

$$P_p = P_{нм1} [x^2 + K_1 (1-x)^2] - P_{нб1} [x + K_2 (1-x)]. \quad (18)$$

Для того, чтобы защита надежно работала при всяком значении x в пределах от 0 до 1, необходимо, чтобы минимальная мощность на клеммах реле была больше мощности трогания, т. е.

$$P_{рмин} = K_n P_{рт}, \quad (19)$$

где $K_n > 1$ — коэффициент надежности.

Для отыскания минимальной мощности на клеммах реле дифференцируем уравнение (18) по x .

$$\frac{dP_p}{dx} = P_{нм1}[2x - 2K_1(1-x)] - P_{нб1}(1-K_2) = 0;$$

значение x , соответствующее минимуму мощности на клеммах реле

$$x_{мин} = \frac{2K_1P_{нм1} + P_{нб1}(1-K_2)}{2P_{нм1}(1+K_1)}; \quad (20)$$

подставляя значение x_m из (20) в уравнение (18), получим следующее выражение для минимальной мощности:

$$P_{рмин} = \frac{K_1P_{нм1}^2 - P_{нм1}P_{нб1}(K_1+K_2) - 0,25P_{нб1}^2(1-K_2)}{P_{нм1}(1+K_1)}. \quad (21)$$

Пренебрегая последним членом числителя по сравнению с другими в выражении (21) и учитывая условие чувствительности (19), получим следующее соотношение:

$$K_n P_{рт} = \frac{K_1 P_{нм1} - P_{нб1}(K_1 + K_2)}{1 + K_1}. \quad (22)$$

Из (22) можно определить максимальный ток во вторичной цепи нулевого трансформатора тока

$$I_{нм1} = \frac{K_n(1+K_1)P_{рт} + P_{нб1}(K_1+K_2)}{K_1 U_{рм1}}. \quad (23)$$

Подставляя значение $I_{нм1}$ в соотношение (15), получим для максимального тока во вторичной цепи внешних трансформаторов тока следующее выражение:

$$I_{вм1} = \frac{(1+K_1)(K_n^2-1)P_{рт} + 2K_nP_{нб1}(K_1+K_2)}{K_1K_nU_{рм1}}. \quad (24)$$

Максимальный первичный ток замыкания на землю, обусловленный заземляющим сопротивлением генератора

$$I_{зм} = n_{тв} I_{вм1}. \quad (25)$$

Отношение коэффициента трансформации нулевого трансформатора тока к коэффициенту трансформации внешних

$$\frac{n_{то}}{n_{тв}} = \frac{(1+K_1)(K_n^2-1)P_{рт} + 2K_nP_{нб1}(K_1+K_2)}{K_n[K_n(1+K_1)P_{рт} + P_{нб1}(K_1+K_2)]}. \quad (26)$$

На рис. 4 построена зависимость $I_{зм} = f(n_{тв})$ для следующих данных:

- 1) мощность трогания реле $P_{рт} = 0,1 \text{ Вт}$;
- 2) номинальное напряжение реле $U_{рн} = 100 \text{ В}$;
- 3) ток небаланса внешних трансформаторов тока $I_{нб1} = 0,02 \text{ амп}$;
- 4) коэффициент надежности $K_n = 1,25$;
- 5) отношение токов небаланса $K_{нб} = 1$;
- 6) частотный коэффициент реле для третьей гармоники (для реле ИМ-43) $K_f = 0,85$;
- 7) кратность напряжения третьей гармоники на клеммах реле по отношению к номинальному напряжению реле $K' = 2$;
- 8) Величина напряжения третьей гармоники в составе фазового напряжения генератора в долях единицы $K'' = 0,03$ для кривой (1) и $K'' = 0,05$ для кривой (2).

(При измерениях, проведенных на Кемеровской и Новосибирской ЭЭС, величина напряжения третьей гармоники была получена от 3,5 до 4,8% от фазового напряжения генератора).

В соответствии с принятыми коэффициентами в пунктах 5—8 коэффициенты $K_1 = 0,051$ и $K_2 = 1,7$ для кривой (1) и $K_1 = 0,085$ и $K_2 = 1,7$ для кривой (2).

Из рис. 4 видно, что токи замыкания на землю при применении этой защиты получаются примерно того же порядка, что и для употребляемых в настоящее время защит, но рассматриваемая защита не имеет мертвой

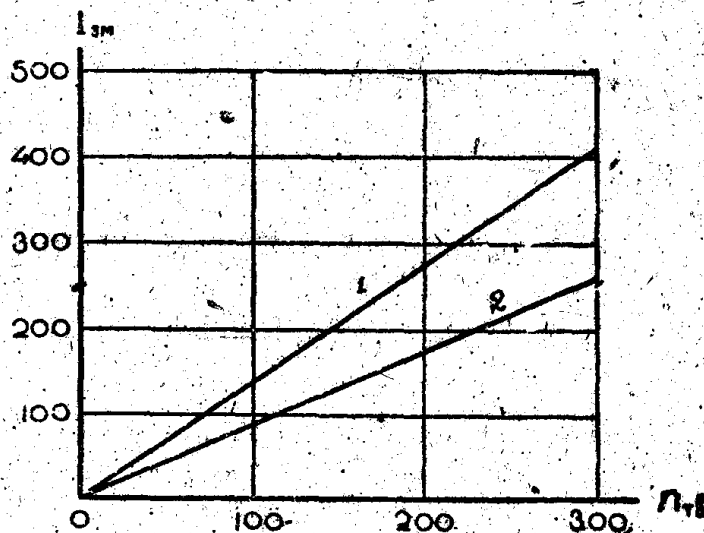


Рис. 4

зоны. Практическое значение этой защиты может быть установлено лишь после испытания ее в условиях эксплуатации.

Величина напряжения между точками а и b (рис. 1) для первой гармоники может быть определена из уравнения (3):

$$U_1 = U_{рн} \sqrt{1 + (n^2 - 2n) \left(\frac{X_p}{Z_{р1}} \right)^2}.$$

Для реле заземления типа ИМ отношение $\frac{X_p}{Z_{р1}} = 0,98$, тогда при $n = 12$

напряжение $U_1 = U_{рн} \sqrt{1 + (144 - 24) \cdot 0,98^2} = 10,8 U_{рн}$.

Вследствие этого пришлось бы применить для питания обмотки напряжения реле нестандартный трансформатор напряжения или пользоваться схемой рис. 1.