

Литература

1. *Лямец Ю.Я.* Распознавание аварийных состояний энергообъекта посредством локализации альтернативных режимов / Ю.Я. Лямец, П.И. Воронов, А.Б. Атнишкин // *Электричество*. – 2018. – № 9. – С. 29–38.

2. *Белянин А.А.* Адекватность или неадекватность модели как критерии состояния объекта / Ю.Я. Лямец, А.А. Белянин, П.И. Воронов, М.В. Мартынов // *Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы X Всерос. науч.-техн. конф.* – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. – С. 244–246.

3. *Белянин А.А.* Модель силового трансформатора как составная часть алгоритма защиты от витковых замыканий / А.А. Белянин, М.Ю. Широкин // *Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф.* – Т. 1. – Казань, 2016. – С. 439–442.

4. *Белянин А.А.* Новый подход к защите трансформатора / А.А. Белянин, М.Ю. Широкин // *Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы I Междунар. науч.-техн. конф.* – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – С. 67–71.

5. *Белянин А.А.* Метод локализации для распознавания внутренних повреждений силового трансформатора, происходящих на фоне внешних / А.А. Белянин, А.Н. Маслов, И.В. Смирнова, М.Ю. Широкин // *Вестник Чувашского университета*. – 2019. – № 3. – С. 22–28.

А.Н. Никитина, В.С. Петров, В.А. Наумов, В.И. Антонов
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ УСТАВОК АЛАР ПРИ ПРОМЕЖУТОЧНОМ ОТБОРЕ МОЩНОСТИ НА ЛЭП

Селективность действия устройств АЛАР и, следовательно, успешность ликвидации асинхронного режима сети во многом зависят от точности определения местоположения электрического центра качаний (ЭЦК) [1]. Это требование достаточно легко выполняется при защите транзитной электропередачи без отбора

мощности [2, 3]. Совершенно иначе обстоит дело при защите ЛЭП с ответвительными или проходными подстанциями, например ЛЭП 110–220 кВ. Отбираемая мощность на этих подстанциях меняется в широких пределах и недоступна для измерений, что значительно усложняет задачу идентификации появления ЭЦК на части контролируемого участка, находящейся за местом отбора мощности. Очевидно, что неправильный выбор расчётных режимов приводят либо к ложному действию АЛАР при расположении ЭЦК вне контролируемого участка, либо к несрабатыванию при расположении ЭЦК на контролируемом участке.

Задача учета влияния промежуточного отбора мощности на работу устройств АЛАР известна давно, в технической и научной литературе описано множество различных способов её решения. Например, в источнике [4] в различных рабочих и ремонтных схемах предлагается выбирать усредненные характеристики срабатывания АЛАР. Успешность такого подхода во многом зависит от профессиональных качеств специалиста по расчёту режимов, и нередко принятые решения бывают далеки от оптимального.

Авторами предлагается способ учета промежуточного отбора мощности линий 110–220 кВ в устройстве АЛАР, оптимальный по критерию точности определения местоположения ЭЦК на контролируемом участке. Актуальность темы статьи продиктована, прежде всего, широким применением устройств АЛАР в противоаварийной автоматике линий напряжением 110–220 кВ, изобилующих промежуточным отбором мощности.

Рассмотрим выбор оптимальных уставок АЛАР при контроле электропередачи 110–220 кВ с промежуточным отбором мощности (рис. 1).

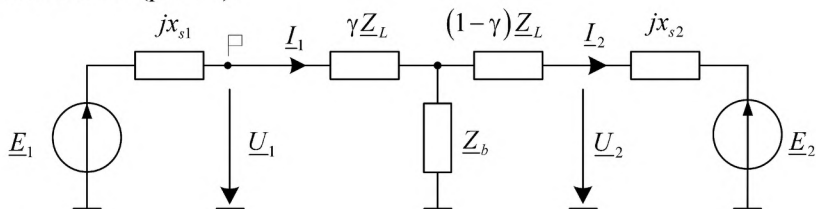


Рис. 1. Расчётная схема электрической сети с промежуточным отбором мощности (место установки устройства АЛАР обозначено флажком, электрическая удаленность точки промежуточного отбора мощности от места установки устройства задается коэффициентом γ)

Промежуточный отбор мощности характеризуется неизменной в асинхронном режиме комплексной мощностью \underline{S}_b из диапазона от минимальной $\underline{S}_{b,\min} = S_{b,\min} e^{j\varphi_{b,\min}}$ до максимальной $\underline{S}_{b,\max} = S_{b,\max} e^{j\varphi_{b,\max}}$ величины [5].

АЛАР на угловом принципе [2] измеряет угол δ_c между напряжением в месте установки \underline{U}_1 и оценкой напряжения в конце контролируемой зоны (в нашем случае на противоположном конце линии)

$$\hat{\underline{U}}_2 = \underline{U}_1 - \gamma \underline{Z}_L \underline{I}_1 - (1 - \gamma) \underline{Z}_L \hat{\underline{I}}_2. \quad (1)$$

В оценке напряжения $\hat{\underline{U}}_2$ присутствует неопределённость, связанная с неизвестностью величины нагрузки \underline{Z}_b . Обычно она разрешается путем задания в настройках АЛАР фиксированной мощности нагрузки $\underline{S}_{b,\text{set}}$. Уставочное значение сопротивления нагрузки в АЛАР рассчитывается через номинальное напряжение сети $U_{\text{ном}}$:

$$\underline{Z}_{b,\text{set}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{b,\text{set}}} e^{j\varphi_{b,\text{set}}}. \quad (2)$$

Тогда оценка тока на участке линии за промежуточным отбором мощности вычисляется следующим образом:

$$\hat{\underline{I}}_2 = \underline{I}_1 \left(1 + \gamma \frac{\underline{Z}_L}{\underline{Z}_{b,\text{set}}} \right) - \underline{U}_1 \frac{1}{\underline{Z}_{b,\text{set}}}. \quad (3)$$

Принятое допущение, выраженное в виде оценки (3), приводит к ошибке в оценке напряжения на конце контролируемого участка $\hat{\underline{U}}_2$. Воспользовавшись оценками (1) и (3) и следуя схеме сети (рис. 1), погрешность оценки напряжения \underline{U}_2 можно выразить как

$$\Delta \underline{U}_2 = \hat{\underline{U}}_2 - \underline{U}_2 = (1 - \gamma) \underline{Z}_L (\underline{U}_1 - \gamma \underline{Z}_L \underline{I}_1) \left(\frac{1}{\underline{Z}_{b,\text{set}}} - \frac{1}{\underline{Z}_b} \right). \quad (4)$$

Как видно из диаграммы рис. 2, именно сдвиг вектора оценки \hat{U}_2 относительно вектора напряжения U_2 определяет угловую погрешность АЛАР $\Delta\delta_c$, причем её значение зависит от вектора ошибки ΔU_2 и его положения.

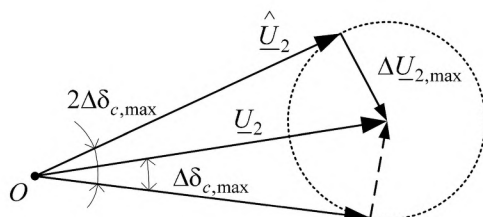


Рис. 2. Диаграмма, иллюстрирующая связь погрешности в оценке угла δ_c с ошибкой ΔU_2 в оценке вектора напряжения U_2 . Положение векторов соответствует условию максимальной угловой погрешности АЛАР

Обозначим проводимостей нагрузки как

$$\Delta Y_b = \frac{1}{Z_b} - \frac{1}{Z_{b,set}}. \quad (5)$$

Из выражения (4) видно, что погрешность ΔU_2 оценки напряжения на противоположном конце контролируемого участка U_2 прямо пропорционально разности ΔY_b в задании уставки проводимости нагрузки в соответствии с формулой (5) и достигает максимального значения $\Delta U_{2,max}$ при расположении точки промежуточного отбора мощности около места установки устройства АЛАР, т. е. при $\gamma = 0$.

Определим условия оптимальности выбора уставки по мощности промежуточного отбора.

Как следует из выражений (4) и (5), минимальная погрешность оценки напряжения \hat{U}_2 достигается при

$$\Delta Y_b = \frac{\Delta S_b}{U_{nom}^2} \rightarrow \min, \quad (6)$$

где ΔS_b представляет собой модуль разности мощности нагрузки

$$\Delta \underline{S}_b = S_b e^{j\varphi_b} - S_{b,\text{set}} e^{j\varphi_{b,\text{set}}} . \quad (7)$$

Для выполнения условия оптимальности (6) необходимо во всем диапазоне изменения мощности промежуточного отбора \underline{S}_b обеспечить минимальность модуля $\Delta \underline{S}_b$ любого из возможных векторов $\Delta \underline{S}_b$ по выражению (7).

Удобно анализировать правила выполнения условия оптимальности (6) на комплексной плоскости с координатными осями P и jQ (рис. 3). Интуитивно ясно, что конец вектора уставки по мощности $\underline{S}_{b,\text{set}}$ должен лежать в центре окружности O_1 , описывающей область изменения мощности нагрузки, очерченной сектором $A-B-C-D$.

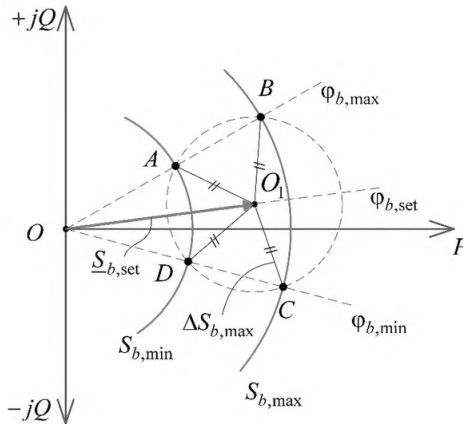


Рис. 3. Правило выбора уставки по мощности $\underline{S}_{b,\text{set}}$

Характеристические параметры уставки будут следующими:
модуль

$$S_{b,\text{set}} = \frac{S_{b,\text{max}} + S_{b,\text{min}}}{2 \cos \frac{\varphi_{b,\text{max}} - \varphi_{b,\text{min}}}{2}} \quad (8)$$

и аргумент

$$\varphi_{b,\text{set}} = \frac{1}{2} (\varphi_{b,\text{max}} + \varphi_{b,\text{min}}) . \quad (9)$$

Напомним, уставка по сопротивлению для алгоритмической модели промежуточного отбора мощности в АЛАР определяется по формуле (2) с учетом уставок (8) и (9). Отметим, что минимальная мощность промежуточного отбора может быть равна нулю, т.е. $S_{b,\min} = 0$.

Формулы (8) и (9) определяют оптимальные параметры промежуточного отбора мощности для всех γ . Выбор $S_{b,\text{set}}(Z_{b,\text{set}})$ не обеспечивает полного исключения погрешности АЛАР, а лишь определяет условие минимальности угловой погрешности.

Литература

1. Беркович М.А. Основы автоматики энергосистем / М.А. Беркович. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 432 с.

2. Никитина А.Н. Способ ликвидации асинхронного режима при электрическом центре качания в месте установки устройства / А.Н. Никитина, В.С. Петров // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. – С. 348–350.

3. Елкин С.В. Применение векторных измерений для определения параметров АЛАР / С.В. Елкин, Е.Н. Колобродов, Т.Г. Климова // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 2. – С. 28–31.

4. Принципиальные схемы устройств автоматического прекращения асинхронного хода. Типовые материалы для проектирования № 407-0-174.88 / Институт «Энергосетьпроект», 1988.

5. Гоник Я.Е. Автоматика ликвидации асинхронного режима / Я.Е. Гоник, Я.Е. Иглицкий. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 112 с.

М.В. Убасева, В.С. Петров, В.А. Наумов, В.И. Антонов
(Чебоксары, ЧГУ им. И.Н. Ульянова, ООО НПП «ЭКРА»)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТ ДВОЙНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

В сетях с изолированной нейтралью однофазное замыкание на землю часто переходит в двойное замыкание [1, 2, 3], которое требует немедленного отключения поврежденной линии электропере-