

Apéndice A

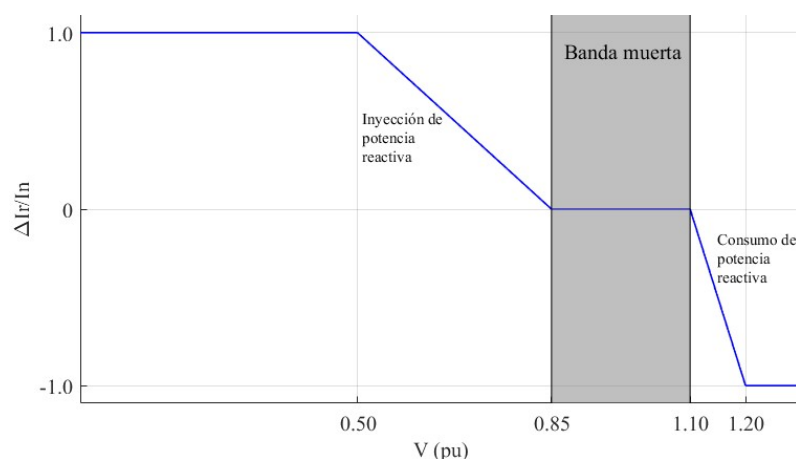
Los sistemas de generación basados en inversores tienen limitaciones en la inyección de corriente debido a las limitaciones de los componentes electrónicos. En general, los códigos de red presentan la curva característica de inyección adicional de corriente reactiva para dar soporte a la tensión de la red. Sin embargo, los requerimientos de inyección de corriente activan bajo estado de falla no están definidos. Teniendo en cuenta que las características de corrientes de plantas de generación basadas en inversores no se han estudiado de manera amplia, Gallego et al., (2022) ha propuesto los siguientes métodos:

1. Control de Potencia Activa Constante (PAC)
2. Control de Potencia Reactiva Constante (PRC)
3. Control de Corriente Activa Constante (CAC)
4. Control de Corriente Activa Variable (CAV)
5. Control de Corriente Máxima (CCM)

El requerimiento de inyección adicional de corriente reactiva según el código de red de Brasil se presenta en la Figura 1.

Figura 1.

Rampa de corriente reactiva adicional para control de tensión según el CR de Brasil



Se puede observar una relación lineal entre la inyección de corriente reactiva requerida y la tensión eficaz del punto de conexión durante el estado de falla. Las ecuaciones que definen este comportamiento están dadas por:

$$\begin{cases} \Delta I_r = \left(-\frac{20}{7} \cdot V + \frac{17}{7} \right) \cdot I_n ; 0,5 \leq V \leq 0,85 \\ \Delta I_r = 1 \cdot I_n ; V < 0,5 \\ \Delta I_r = 0 ; 0,85 \leq V \leq 1,1 \end{cases} \quad (1)$$

Los métodos para el control de inyección de corriente reactiva permiten calcular la corriente de falla de la planta de generación. Para el caso del artículo publicado por Gallego (2022), se realizó la simulación del un modelo compuesto por una fuente infinita con nivel de tensión de 230 kV que actúa como fuente principal, dos líneas de transmisión de 80 km de longitud que conectan a la fuente un transformador de 120 MVA 230/25 kV, y una planta de generación fotovoltaica de 100 MW instalada en el lado de baja del transformador, la cual está programada para dar soporte de tensión ante fallas mediante la inyección de una corriente de falla (I_{pv}). Para calcular I_{pv} es necesario tener los valores de corriente de falla activa (i_d) y corriente de falla reactiva (i_q). I_{pv} se calcula con la Ecuación (2)

$$I_{pv} = \sqrt{(i_d)^2 + (i_q)^2} \quad (2)$$

Se simula una falla en una de las líneas de transmisión, variando la resistencia de falla hasta que la tensión en el punto de conexión alcance un valor de 0,85 pu con el objetivo de analizar las corrientes de falla por medio de distintos métodos.

En este Anexo se pretende mostrar el procedimiento de cálculo de I_{pv} para cada uno de los métodos de inyección de corriente reactiva propuestos por Gallego (2022), asumiendo que la tensión en el punto de conexión durante la falla es de 0,8 pu. En todos los casos, la corriente nominal I_n se considera igual a 1, asumiendo como base su valor nominal. Es importante resaltar

que k_p , k_q , β e I_{max} son valores constantes pero pueden variarse para obtener diferentes resultados de I_{pv} . Para efectos de mostrar en este documento, k_p , k_q , y β se establecen en 0,5. I_{max} se establece en 1,2 con base en la ficha técnica del inversor ABB PVS800-57B-1732kW-C que posee una $I_n=2500$ A y una $I_{max}=3000$ A, relación $I_{max}/I_n=1,2$. Luego, los valores que se mantendrán iguales para todos los métodos son:

- $k_p = k_q = \beta = 0,5$
- $I_{max} = 1,2$
- $I_n = 1$
- $v = 0,8$

1. Potencia Activa Constante (PAC)

El primer paso es calcular la corriente activa, haciendo uso de la Ecuación (3):

$$i_d = \frac{k_p}{v} \cdot i_n \quad (3)$$

Donde:

i_d : Corriente activa constante.

k_p : Relación de corriente activa. $0 \leq k_p \leq 1$

v : Tensión del punto de conexión durante la falla.

i_n : Corriente nominal en pu.

$$i_d = \frac{0,5}{0,8} \cdot 1 = 0,625$$

Posteriormente, se evalúa (1) en $v=0,8$ y se obtiene i_q así:

$$i_q = -\frac{20}{7} \cdot 0,8 + \frac{17}{7} \cong 0,143$$

Finalmente, se evalúan i_d e i_q la Ecuación (2), obteniendo I_{pv} :

$$I_{pv} = \sqrt{(0,625)^2 + (0,143)^2} \cong 0,641$$

2. Potencia Reactiva Constante (PRC)

En este método, a diferencia del método de PAC, se supone un valor de $i_d=0$ se calcula i_q para mantener la potencia reactiva constante. Por lo tanto, se debe asegurar que la i_q calculada cumpla con el requerimiento mínimo del código de red, en el cual, para una tensión de 0,5 pu exige una inyección del 100% de corriente reactiva. La Ecuación (4) define la i_q calculada en el método PRC:

$$i_q = \frac{k_q}{v} \quad (4)$$

El primer paso es evaluar los valores para los cuales la relación de potencia activa k_q satisface la Ecuación (1) de los requisitos mínimos del código de red, evaluando i_q en una tensión de 0,5 pu:

	Nivel de tensión [pu]					0,5
k_q	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	
i_q	0,8	1	1,2	1,4	1,6	

Como se observa, un valor de $k_q = 0,4$ no satisface el requerimiento del código de red de Brasil, ya que ante una tensión de 0,5 pu se inyectaría una corriente reactiva de $i_q = 0,8$, valor que se encuentra por debajo del mínimo exigido de $i_q = 1$ pu. Por lo tanto, no es viable utilizar un valor de k_q inferior a 0,5, que representa el límite de cumplimiento según la gráfica del código de red. Para los cálculos posteriores se va a asumir un $k_q = 0,5$. Usando la Ecuación (4) se calcula i_q :

$$i_q = \frac{0,5}{0,8} = 0,625$$

Finalmente se halla el valor de la corriente de falla de la planta fotovoltaica usando la Ecuación (2):

$$I_{pv} = \sqrt{(0,625)^2 + (0)^2} = 0,625$$

3. Corriente Activa Constante (CAC)

El controlador CAC tiene la capacidad de inyectar potencia activa constante ante la ocurrencia de condiciones de desequilibrio. Para esto, la relación de corriente activa (β) se varía entre 0 y 1 ($0 \leq \beta \leq 1$). En este caso se usará un $\beta=0,5$. Se calcula i_d mediante la Ecuación (5):

$$i_d = \beta \cdot i_n \quad (5)$$

Puesto que $i_n = 1$, entonces $i_d = \beta = 0,5$. El valor de i_q se calcula mediante el código de red usando la Ecuación (1), tal y como en el método PAC:

$$i_q = -\frac{20}{7} \cdot 0,8 + \frac{17}{7} \cong 0,143$$

Finalmente, se evalúan i_d e i_q la Ecuación (2), obteniendo I_{pv} :

$$I_{pv} = \sqrt{(0,625)^2 + (0,143)^2} \cong 0,641$$

4. Corriente Activa Constante (CAV)

Este método consiste en la variación de la corriente máxima i_{max} . Un valor alto de i_{max} permite aumentar la contribución de corriente de falla de la planta fotovoltaica. Sin embargo, se debe tener en cuenta que esta corriente está limitada por las protecciones internas contra sobrecorriente del inversor. La corriente i_q se calcula con el código de red en este método, así:

$$i_q = -\frac{20}{7} \cdot 0,8 + \frac{17}{7} \cong 0,143$$

Para una corriente máxima $i_{max} = 1,2$ se puede determinar i_d con la Ecuación (6):

$$i_d = i_{max} - i_q \quad (6)$$

$$i_d = 1,2 - 0,143 = 1,057$$

Y finalmente, mediante la Ecuación (2) se obtiene: $I_{pv} = 1,067$.

5. Corriente de Corriente Máxima (CCM)

El método CCM tiene como finalidad proteger los inversores, puesto que la corriente activa i_d está en función de la corriente reactiva calculada mediante el uso del código de red. El objetivo es inyectar la máxima corriente del inversor, cumpliendo el requerimiento mínimo exigido por el código de red de i_q . Para desarrollar este método de forma matemática se varía la corriente máxima i_{max} . En este ejemplo, $i_{max} = 1,2$. Con estos datos, se realiza el cálculo de i_d usando la Ecuación :

$$i_d = \sqrt{(i_{max})^2 - (i_q)^2} \quad (7)$$

$$i_d = \sqrt{(1,2)^2 - (0,143)^2} = 1,191$$

Como la corriente máxima i_d se configura para entregar la máxima corriente del inversor, se tiene que $i_{max} = 1,2$. En la Tabla 1 se resumen el procedimiento y los resultados obtenidos usando los 5 métodos de control de inyección de corriente:

Tabla 1.

Cálculo de corrientes de falla para cinco métodos distintos de inyección de corriente reactiva.

Potencia Activa Constante (PAC)	k_p	0,500	Relación de potencia activa
	v	0,800	Tensión de PCC durante la falla (pu)
	i_n	1,000	Corriente nominal del inversor fotovoltaico
	i_d	0,625	Corriente activa constante: $i_d = (k_p/v)*i_n$
	i_q	0,143	Corriente reactiva de referencia (obtenida del código de red)
	I_{pv}	0,641	Corriente de falla del parque fotovoltaico: $I_{pv} = \sqrt{(i_d^2+i_q^2)}$
Potencia Reactiva Constante (PRC)	k_q	0,500	Relación de potencia activa (valores k_q que satisfacen i_q según el CR: $k_q \geq 0.5$)
	v	0,800	Tensión de PCC durante la falla (pu)
	i_n	1,000	Corriente nominal del inversor fotovoltaico
	i_d	0,000	Corriente activa constante (se estima inicialmente en 0)
	i_q	0,625	Corriente reactiva de referencia: $i_q = k_q/v$
	I_{pv}	0,625	Corriente de falla del parque fotovoltaico: $I_{pv} = \sqrt{(i_d^2+i_q^2)}$
Corriente Activa Constante (CAC)	β	0,500	Relación de corriente activa ($0 \leq \beta \leq 1$)
	v	0,800	Tensión de PCC durante la falla (pu)
	i_n	1,000	Corriente nominal del inversor fotovoltaico
	i_d	0,500	Corriente activa constante: $i_d = \beta*i_n$
	i_q	0,143	Corriente reactiva de referencia (obtenida del código de red)
	I_{pv}	0,520	Corriente de falla del parque fotovoltaico: $I_{pv} = \sqrt{(i_d^2+i_q^2)}$
Corriente Activa Variable (CAV)	i_{max}	1,200	Corriente máxima (i_{max} se varia en este método. Para este ejemplo $i_{max}=1,2$)
	v	0,800	Tensión de PCC durante la falla (pu)
	i_n	1,000	Corriente nominal del inversor fotovoltaico
	i_q	0,143	Corriente reactiva de referencia (obtenida del código de red)
	i_d	1,057	Corriente activa: $i_d = i_{max}-i_q$
	I_{pv}	1,067	Corriente de falla del parque fotovoltaico: $I_{pv} = \sqrt{(i_d^2+i_q^2)}$
Corriente de Corriente Máxima (CCM)	i_{max}	1,200	Corriente máxima (i_{max} se varia en este método. Para este ejemplo $i_{max}=1,2$)
	v	0,800	Tensión de PCC durante la falla (pu)
	i_n	1,000	Corriente nominal del inversor fotovoltaico
	i_q	0,143	Corriente reactiva de referencia (obtenida del código de red)
	i_d	1,191	Corriente activa: $i_d = \sqrt{(i_{max}^2-i_q^2)}$
	I_{pv}	1,200	Corriente de falla del parque fotovoltaico: $I_{pv} = \sqrt{(i_d^2+i_q^2)}$