



RED
ELÉCTRICA
DE ESPAÑA

Criterios técnicos de evaluación de fortaleza de red para integración de MPE de acuerdo a la literatura técnica existente

Dirección Desarrollo de la Red
Dpto. Fiabilidad del sistema eléctrico

28 de febrero de 2019



Índice

1	Objetivo e introducción	3
2	Definiciones	5
3	Revisión de los índices recogidos en la literatura técnica	6
o	3.1 Índices basados en potencia de cortocircuito	6
o	3.1.1 Equivalent short circuit ratio (ESCR).....	6
o	3.1.2 Composite short circuit ratio (CSCR)	7
o	3.1.3 Weighted short circuit ratio (WSCR)	7
o	3.1.4 Comparativa de ESCR, CSCR, WSCR_{MVA} y WSCR_{MW}	8
o	3.2 Otros índices	8
4	Referencias	10



1 Objetivo e introducción

Ante la solicitud de conexión de un nuevo módulo de parque eléctrico (MPE)¹ a un punto de conexión dentro de un sistema de potencia es necesario asegurar tanto la integridad del sistema de potencia al que pretende conectarse como la del propio MPE. Para ello hay que garantizar que el punto de conexión es suficientemente fuerte como para minimizar y evitar posibles fenómenos de interacción como son por ejemplo, inestabilidades de tensión y/o frecuencia, interacción entre controles o problemas de resonancia entre distintas máquinas.

Actualmente para la generación no gestionable se utiliza como criterio para determinar la capacidad disponible en un punto de la red con objeto de poder otorgar el permiso de acceso a la red (Título IV del RD1955/2000), la limitación incluida en el Anexo XV del RD 413/2014: *“Para la generación no gestionable, la capacidad de generación de una instalación o conjunto de instalaciones que compartan punto de conexión no exceda de 1/20 de la potencia de cortocircuito de la red en dicho punto”*. Este es un número histórico desde la Orden Ministerial de septiembre de 1985 con el que se ha pretendido conseguir una distribución uniforme de la generación renovable de nueva instalación. No obstante, desde la perspectiva técnica puede no ser del todo adecuado principalmente por los siguientes motivos:

- a) El límite histórico empleado de 1/20 de la potencia de cortocircuito de la red no está plenamente ligado a las capacidades de funcionamiento real de la generación renovable existente y futura;
- b) Desde la perspectiva del impacto que tiene la potencia de cortocircuito en las condiciones de funcionamiento de la electrónica de potencia debería aplicar a MPE (generadores que están conectados de forma no síncrona a la red o que están conectados mediante electrónica de potencia) independientemente de su grado de gestionabilidad;
- c) Es un criterio nodal y no zonal, por lo que no tiene en cuenta la influencia de MPE conectados en nudos eléctricamente próximos;
- d) No está claramente definido ya que no estipula que potencia de cortocircuito (máxima, mínima, media, etc.) debe emplearse para el cálculo.

Por todo lo anterior, resulta necesario explorar criterios, ligados directa o indirectamente a la potencia de cortocircuito², que garanticen el correcto funcionamiento de los MPE existentes y futuros y del sistema eléctrico en su conjunto, y que se puedan emplear para determinar la capacidad disponible en un punto de conexión con objeto de evaluar las solicitudes de acceso a la red, en condiciones de seguridad, transparencia y no discriminación. Por tanto, la nueva metodología propuesta debería, en todo caso, preservar el carácter de criterio seguro, con aplicabilidad sistemática y trazable, y suficientemente estable en el tiempo.

En este documento se recoge una recopilación de los criterios definidos en la literatura, así como una comparativa de éstos, para evaluar la fortaleza de la red a la hora de conectar equipos de electrónica de potencia. Es importante señalar que los diferentes criterios existentes en esta materia proporcionan valores indicativos ya que la problemática completa y sus soluciones solo pueden analizarse con estudios de detalle abordados con programas de simulación electromagnética. En cualquier caso, este tipo de estudios individualizados, no se considera una opción viable para la evaluación de capacidades de acceso debido a su complejidad técnica, al tiempo de análisis requerido (no compatibles en ningún caso con los plazos legales de respuesta marcados por la normativa) y a la necesidad de disponer para su realización

¹ Definición de MPE de acuerdo a la definición del reglamento (UE) 2016/631 que establece un código de red sobre requisitos de conexión de generadores a la red: *“una unidad o un conjunto de unidades que genera electricidad, que está conectado de forma no síncrona a la red o que está conectado mediante electrónica de potencia, y que además dispone de un solo punto de conexión a una red de transporte, una red de distribución, incluidas las redes de distribución cerradas, o un sistema HVDC”*.

² Con independencia de la existencia de otros posibles criterios adicionales que pudieran regularse en la normativa



de los modelos detallados de los MPE a conectar (y existentes) no disponibles en la práctica al ser modelos específicos que deben proporcionar los fabricantes.



2 Definiciones

A los efectos exclusivos de este documento, se proponen las siguientes definiciones:

- Punto de conexión (PC): es el nudo al que el MPE está conectado a la red de transporte o de distribución y donde debe evaluarse la capacidad de acceso a la red. En todo momento se consideran las condiciones existentes en el punto de conexión a la red de transporte/distribución del MPE(s), no teniéndose en cuenta la posible red existente entre el punto de conexión, el MPE y las distintas máquinas/inversores.
- HV (High Voltage): nudo de conexión de alta tensión.
- MV (Medium Voltage): nudo de conexión de media tensión.
- S_{cc} : potencia de cortocircuito en el punto de conexión previa a la conexión del MPE. En función del índice que se calcule este parámetro irá expresado en MVA. Se indica específicamente en cada indicador.
- P_{MPEi} (MW): potencia nominal del MPE que ha solicitado la conexión en el punto de conexión.
- SCR (Short Circuit Ratio): ratio entre la potencia de cortocircuito en el punto de conexión y la potencia nominal del MPE o enlace HVDC.

$$SCR = \frac{S_{cc} (MVA)}{P_{MPE/HVDC}} \quad (1)$$

- MIIF (Multi Infeed Interaction Factor): factor que evalúa si dos nudos se encuentran eléctricamente próximos entre sí [1]. Se calcula como el incremento de tensión que sucede en el nudo i ante una pequeña variación de tensión en el nudo j .

$$MIIF_{i,j} = \frac{\Delta V_i}{\Delta V_j} \quad (2)$$

Dos nudos están eléctricamente alejados si $MIIF \approx 0$, es decir, la interacción entre ellos es nula.

Dos nudos están eléctricamente próximos si $MIIF \approx 1$, es decir, habría una gran interacción entre ellos.

- ESCR (Equivalent Short Circuit Ratio): índice basado en la S_{cc} que considera el impacto de los MPE conectados eléctricamente cercanos al nudo a evaluar (véase apartado 3.1.1).
- CSCR (Composite Short Circuit Ratio): índice basado en la S_{cc} que considera el impacto de los MPE eléctricamente cercanos al nudo a evaluar pudiendo éstos compartir el mismo punto de conexión (véase apartado 3.1.2).
- WSCR (Weighted Short Circuit Ratio): índice basado en la S_{cc} que determina la fortaleza de la red para conectar MPE teniendo en cuenta el impacto de otros MPE adyacentes al nudo a evaluar (véase apartado 3.1.3).



3 Revisión de los índices recogidos en la literatura técnica

3.1 Índices basados en potencia de cortocircuito

Históricamente, el índice SCR ha sido el indicador más extendido para calcular la fortaleza del sistema de potencia (capacidad para responder a variaciones de potencia activa y reactiva), en especial, para la conexión de parques eólicos y enlaces HVDC, principalmente enlaces tipo LCC (Line Commutated Converter: HVDC clásico).

Una red es considerada débil frente a la conexión de un determinado MPE (típicamente $SCR < 5$ en el nudo HV, de acuerdo a determinada literatura técnica [2]) o muy débil (típicamente $SCR < 3$ en el nudo HV, de acuerdo a [2]), cuando el sistema de potencia es más sensible a inyecciones de potencia activa y/o reactiva y, por lo tanto, la conexión de un nuevo MPE puede complicar su estabilidad (fallos a soportar huecos de tensión, interacción entre controles, inestabilidades en los controles, etc.).

Sin embargo, una red es considerada fuerte (típicamente $SCR > 5$, de acuerdo a [2]) cuando el sistema de potencia es más inalterable ante cambios de potencia activa y/o reactiva y con menor tendencia a inestabilidades.

A pesar del generalizado uso de este índice, lo cierto es que hay algunas deficiencias en su cálculo y aplicación. Por ejemplo, ante la conexión de un nuevo parque eólico, el índice SCR lo trata siempre como un ente independiente cuando en realidad podría formar parte de un “cluster” cercano. Para suplir estas deficiencias se han desarrollado otros tres métodos alternativos, también basados en la potencia de cortocircuito en el punto de conexión, pero que tienen en cuenta la participación del resto de MPE conectados en la zona. Estos tres métodos, según [2] y [3] son:

- Equivalent SCR (ESCR);
- Composite SCR (CSCR);
- Weighted SCR (WSCR).

Cabe destacar que estos métodos tratan de comprobar la fortaleza del punto de conexión con dos objetivos claros:

- Evaluar el impacto de generadores cercanos en la integridad del MPE que ha solicitado acceso a la red;
- Evaluar el impacto del MPE que ha solicitado acceso a la red en la integridad del resto de generadores y su efecto en la demanda.

3.1.1 Equivalent short circuit ratio (ESCR)

Este método es preferente cuando el MPE que ha solicitado acceso de conexión no comparte con otros MPE el mismo punto de conexión ni de HV ni de MV:

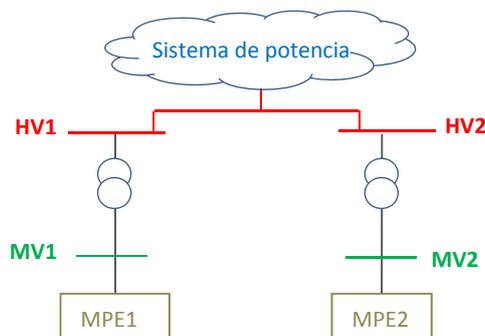


Figura 1. MPE conectados a un mismo sistema de potencia a través de nudos distintos de alta y media tensión



El ESCR se define en términos de potencia, teniendo en cuenta el factor de influencia MIIF con respecto a otros nudos próximos, tal y como se indica a continuación:

$$ESCR_i = \frac{ScC_i(MVA)}{P_{MPE_i} + \sum_j (MIIF_{j,i} * P_{MPE_j})} \quad (3)$$

3.1.2 Composite short circuit ratio (CSCR)

Este método es preferente cuando puede considerarse que el MPE que ha solicitado acceso de conexión puede compartir el mismo punto de MV con otros MPE cercanos:

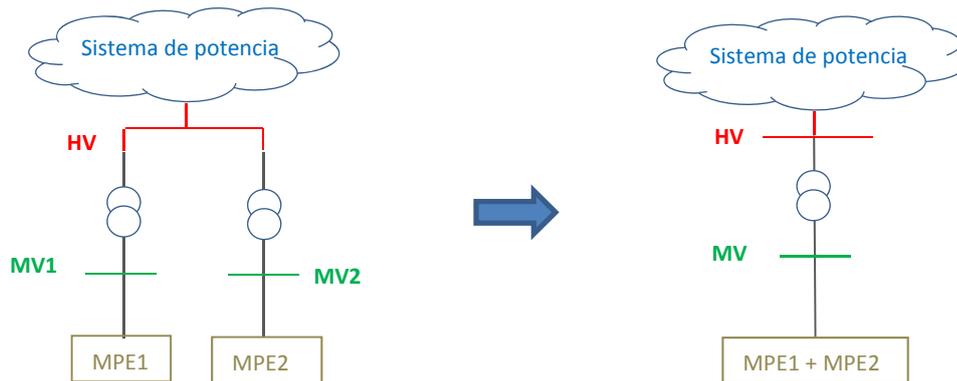


Figura 2. MPE conectados a un mismo sistema de potencia a través del mismo nudo de media tensión

Este indicador crearía un nudo ficticio común de media/alta tensión y consideraría todos los MPE de una determinada área de influencia conectados a dicho nudo, considerando un indicador agregado para todos los MPE en vez de un indicador exclusivo para cada MPE:

$$CSCR = \frac{ScC_{MV}(MVA)}{\sum_i P_{MPE_i}(MW)} \quad (4)$$

Este método se basa en un fuerte acoplamiento eléctrico, pero en la práctica, habrá distancias entre los puntos de conexión de los MPE, por lo que esta interacción no es tan evidente. Aun así, esta aproximación es mejor que considerar exclusivamente el indicador SCR.

General Electric y Enercon recomienda este método para la evaluación de la conexión de parques eólicos en [4].

3.1.3 Weighted short circuit ratio (WSCR)

Este método se utiliza para ponderar la aportación de cada MPE al sistema de potencia al que se conecta.

$$WSCR_{MVA} = \frac{\sum_i^N ScC_i(MVA) * P_{MPE_i}(MVA)}{(\sum_i^N P_{MPE_i}(MVA))^2} \quad (5)$$

$$WSCR_{MW} = \frac{\sum_i^N ScC_i(MVA) * P_{MPE_i}(MW)}{(\sum_i^N P_{MPE_i}(MW))^2} \quad (6)$$

Donde N es el número de MPE conectados y que tienen interacción con el nuevo MPE que ha solicitado acceso a red.

En este índice se tienen en cuenta dos versiones distintas ($WSCR_{MVA}$ y $WSCR_{MW}$) atendiendo a dos posibles modos de calcular el valor de ScC ya que ante la existencia de determinados equipos cercanos (como STATCOM o SVC) resulta más conveniente tener en cuenta $WSCR_{MVA}$ en vez de $WSCR_{MW}$ por las inestabilidades angulares que pueden introducir.

ERCOT emplea este índice ([5], [6], [7]).



3.1.4 Comparativa de ESCR, CSCR, WSCR_{MVA} y WSCR_{MW}

Cada método tiene ventajas e inconvenientes en su aplicación para la valoración de la fortaleza del sistema. Esta comparativa tiene en cuenta los siguientes factores:

- Sencillez de cálculo usando un programa de cortocircuito;
- Sencillez de cálculo de la máxima capacidad de MPE en un determinado;
- Considera MPE próximos;
- Considera equipos que proporcionan únicamente potencia reactiva.

Índice	Sencillez de cálculo	Sencillez de cálculo para determinar capacidad máxima de un nudo	Considera otros MPE próximos	Considera equipos como STATCOM o SVC
SCR	++	++	X	X
ESCR	X	X	++	++
CSCR	+	+	+	X
WSCR _{MVA}	+	X	++	++
WSCR _{MW}	+	X	++	X

Nota: valoración/impacto ++: alto; +: medio; X: bajo

Tabla 1. Comparativa entre los métodos de valoración basados en potencia de cortocircuito

Adicionalmente, conviene resaltar las siguientes consideraciones:

- En los índices ESCR, CSCR, WSCR se debe definir la zona de influencia para realizar el cálculo y esto no es trivial. La literatura menciona el método del MIIIF, sin embargo, tiene la limitación de tener en cuenta exclusivamente las interacciones relacionadas con la tensión, despreciando las relacionadas con la frecuencia, por ejemplo.

O por ejemplo, en el caso particular del cálculo del índice CSCR se podría presentar una situación tal que el nudo A debería considerarse junto al nudo B ya que hay una fuerte interacción entre ambos nudos. Sin embargo el nudo B deberá de considerarse junto al nudo C ya que también hay una elevada interacción entre ellos ¿Sería entonces adecuado considerar como un único nudo A, B y C aunque el nudo A está relativamente poco relacionado con el C?

- Los índices CSCR y ESCR calculan el SCR en el nudo de AT/MV mientras que WSCR proporciona el SCR en un punto de conexión virtual.
- Por regla general, el índice WSCR es más permisivo (proporciona valores mayores) que los índices CSCR y ESCR, aunque el valor final será muy dependiente del valor de S_{cc} empleado en el cálculo.

3.2 Otros índices

Otros índices que también se nombran en la literatura ([2]) pero que son más difíciles de cuantificar y son menos apropiados se enumeran a continuación:

- **Ratio X/R:** Relación entre la reactancia y la resistencia de un sistema visto desde un punto de dicho sistema de potencia tras aplicar un cortocircuito en ese punto. Por regla general un valor elevado de X/R indica un punto de conexión fuerte y se suele considerar como valor típico $X/R < 3$ para poder categorizar a una red como débil. En la red de muy alta tensión este valor es cercano



a 11 en todas las subestaciones alejadas de la generación. En las subestaciones muy cercanas a la generación, el valor es superior. No es fácil definir un criterio de instalación de MPE en función de este parámetro.

- **Inercia del sistema o ratio de cambio de la frecuencia (ROCOF: Rate Of Change Of Frequency):** basado en la determinación de la pendiente o tendencia del cambio de frecuencia con respecto al tiempo. Estudios en Eirgrid³ [8] y en el sur de Australia [9] identificaron que con un ROCOF ≈ 1 Hz/s se podría suponer que el sistema es débil, mientras que si el ROCOF > 2 Hz/s supondría un sistema muy débil. Este criterio puede evaluar la robustez del sistema frente a variaciones de la frecuencia. Podría ser un criterio complementario de algún SCR que tenga en cuenta la estabilidad de tensión, pero por sí mismo, no es uno de los índices recomendados por la literatura técnica a efectos de determinación de capacidad de acceso. Sin embargo, este índice dispone de una serie de desventajas, como son el desconocimiento de la dispersión geográfica de la generación síncrona y no síncrona, y de la posible inercia aportada por los MPE, etc.
- **Ratio Generación No Síncrona vs Generación Síncrona (SNSP: System Non-Synchronous Penetration):** la medida del SNSP de un sistema, medido en un instante dado, es un ratio también nombrado en la literatura para cuantificar la fuerza de un sistema. Sin embargo, este índice dispone de una serie de desventajas, como son el desconocimiento de la dispersión geográfica de la generación síncrona y no síncrona, y de la posible inercia aportada por los MPE, etc.

Por otro lado, AELEC propone en su documento “20190220 Criterios de conexión de generación_aelec v6” [10] criterios asociados al impacto en el sistema (fundamentalmente en las tensiones) que la conexión de generación renovable pudiera tener, sin estar estos indicadores explícitamente definidos en términos de potencia de cortocircuito.

³ Operador estatal de transmisión de energía eléctrica en Irlanda.



4 Referencias

- [1] «Cigre WG B4.41 (2008) "Systems with multiple DC infeed"».
- [2] «Cigre WG B4.62 (2016) "Connection of wind farms to weak AC networks"».
- [3] «"Integrating Inverter-Based Resources into weak Power Systems". Reliability Guideline. June 2017. NERC.».
- [4] «S. Achilles, N. Miller, E. Larse, J. MacDowell, "Stable Renewable Plant voltage and reactive power control". NERC ERSTF. Junio 2014.».
- [5] «F. Huand, "Panhandle and South Texas Stability and System Strength assessment". ERCOT Transmission Planning. Mayo 2018.».
- [6] «Dan Woodfin, "The (Continuing) Evolution of the ERCOT System". ERCOT.».
- [7] «Y. Zhang, S.H.F Huang, J. Schmall, J. Conto, J. Billo and E. Rehman, "Evaluating system strength for large-scale wind plant integration". 2014 IEEE PES General Meeting, National Harbor, MD.».
- [8] «EirGrid Facilitation of Renewables study, available at <http://www.eirgrid.com/mwg-internal/de5fs23hu73ds/progress?id=C9kireUVyKBKnBVPdI2rYDY1ZR7DIzNJfsVCJ5ETGrE>».
- [9] «Renewable Energy Integration in South Australia - Joint AEMO & Electranet Report, available at: <http://www.aemo.com.au/Electricity/Planning/Integrating-Renewable-Energy>».
- [10] "20190220 Criterios de conexión de generación_aelec v6".
- [11] «IEEE Guide for planning DC links Terminating at AC locations Having Low Short-Circuit Capacities».



Paseo del Conde de los Gaitanes, 177
28109 Alcobendas (Madrid)

Tel. 91 650 85 00 / 20 12

www.ree.es