

El efecto en la eficiencia y el consumo de potencia reactiva en las turbinas de viento inductivas utilizando compensación dinámica o convencional a plena carga.

Autor: – R.J. Seagrave – Elspec.

Fecha: – Febrero 15th, 2004.

1) Factor de potencia:

Los generadores eólicos WTG (WTG del término en Inglés Wind Turbine Generator) consumen potencia reactiva (kvar) bajo todas las condiciones de carga: ese consumo aumenta en la medida en que se incrementa la potencia de salida en kW. La gran mayoría de los sistemas WTG poseen sistemas convencionales integrales para la compensación del factor de potencia, diseñado para compensar a los generadores en condiciones de consumo reactivo sin carga. En general esos sistemas son presentados ofreciendo un factor de potencia de 0.96 ~ 0.97, en retraso (inductivo) en el mejor de los casos bajo condiciones de no-carga y hasta un 35 % de la salida del generador. Para salidas más altas, el consumo de potencia reactiva en los WTG se incrementa, a cuenta de consumirla de la red local. Cuando la instalación consiste de un gran número de WTG, esto puede provocar y de hecho provoca un esfuerzo perjudicial para la red eléctrica durante periodos de generación pico de potencia y altos consumos. Como resultado de lo anterior, muchas compañías generadoras/distribuidoras (“utilities”) de energía están especificando sistemas de compensación de factor de potencia a plena carga, con una reacción rápida y un tiempo de adquisición tales que les permita limitar el impacto y reducir la carga en las líneas de transmisión. Este hecho se hará más crítico en la medida en que la generación eólica se vaya convirtiendo en una proporción más alta de la capacidad de generación de potencia disponible, tal como se espera que ocurra en un futuro no muy lejano.

Ejemplos:

Como la potencia de salida de los WTG depende principalmente de las condiciones prevalecientes en el viento, es virtualmente imposible obtener una comparación de datos entre un WTG operando con un sistema de compensación convencional de no carga y un sistema dinámico a plena carga. Los datos siguientes fueron tomados sin embargo, con una velocidad de muestreo ciclo a ciclo, lo cual a 50 Hz significa cada 20 milisegundos: los WTG monitoreados tenían incorporado un sistema dinámico de Elspec diseñado a plena carga el cual podía ser habilitado o deshabilitado cada 20 milisegundos. Esto permitió disponer de la capacidad de monitorear los parámetros de potencia de los WTG ciclo a ciclo y ser testigos del efecto instantáneo de la conexión de la compensación dinámica.

2) Ejemplo 1.

La siguiente tabla representa 7 ciclos de mediciones de una fase tomadas en un WTG inductivo de 1.3 MW, conectado con un sistema de compensación dinámico de Elspec operando con el sistema deshabilitado. El texto en rojo denota potencia activa, kW, exportada.

Tabla 1.

Time	Vp/n-L1 Volts	Mains I-L1 Amps	P-GEN-L1 kW	MainsS-L1 kVA	MainsQ-L1 kvar	GEN-Q kvar	PFCQ-L1 kvar	PF-L1
13:02:44.658	400.22	887.06	305.52	355.05	180.88	180.88	0.00	-0.861
13:02:44.678	400.22	922.44	319.47	369.19	185.05	185.05	0.00	-0.865
13:02:44.698	400.31	939.19	325.50	376.01	188.24	188.24	0.00	-0.866
13:02:44.718	400.03	952.44	330.30	381.00	189.90	189.90	0.00	-0.867
13:02:44.738	400.28	960.88	334.10	384.65	190.61	190.61	0.00	-0.869
13:02:44.758	400.19	968.00	336.43	387.38	192.03	192.03	0.00	-0.868
13:02:44.778	400.06	981.62	341.46	392.75	194.06	194.06	0.00	-0.869

Tal como lo muestra la Tabla 1, el factor de potencia operativo en fase 1 (PF-L1), a un 75 % de la carga, nunca excede 0.87 en atraso, y el consumo de reactivo (GEN-Q) se encuentra en alrededor del 58 % de la potencia de salida generada y fluctuando ciclo a ciclo. La corriente medida en el transformador de la turbina (Mains I-L1) es 130 A más alta que la corriente activa generada.

El sistema Standard sin carga de compensación del factor de potencia especificado para esta turbina esta dimensionado en 350 kvar, esto es, 116.6 kvar por fase, lo cual representa sólo el 61 % del consumo de potencia reactiva del generador a un 75 % de la salida, esto es, 325 kW. Si un sistema sin carga hubiera estado en operación, el factor de potencia habría sido mejorado hasta 0.97 en atraso y sin embargo, todavía 72 kvar habrían sido consumidos de la red de alimentación eléctrica.

Con grandes instalaciones conectadas a líneas de transmisión o transformadores de red con una limitada capacidad, esto puede resultar en la desconexión de turbinas (cortes de energía) debido a sobre capacidad: por lo tanto es recomendable, en esas circunstancias, instalar un sistema de compensación a plena carga para asegurarse de que la potencia exportada desde el parque eólico sea principalmente potencia activa, lo que optimizaría el retorno de la inversión.

La siguiente Tabla 2 es una continuación de las mediciones anteriores, pero ahora con el sistema de compensación dinámica de Elspec *habilitado* electrónicamente dentro de 1 ciclo. El sistema está dimensionado a 660 kvar y al voltaje nominal de fase a neutro de 398.3 V. El texto rojo denota: potencia activa exportada, kW; potencia reactiva exportada, kvar y factor de potencia en atraso. Al igual que anteriormente, la turbina estaba operando a aproximadamente un 75 % de su salida durante el periodo de medición.

Tabla 2.

Tiempo	Vp-L1 V	GEN I-L1 A	P-GEN-L1 kW	MainsS-L1 kVA	MainsQ-L1 kvar	GEN-Q kvar	PFCQ-L1 kvar	PF-L1
13:02:44.658	400.22	887.06	305.52	355.05	180.88	180.88	0.00	-0.861
13:02:44.678	400.22	922.44	319.47	369.19	185.05	185.05	0.00	-0.865
13:02:44.698	400.31	939.19	325.50	376.01	188.24	188.24	0.00	-0.866
13:02:44.718	400.03	952.44	330.30	381.00	189.90	189.90	0.00	-0.867
13:02:44.738	400.28	960.88	334.10	384.65	190.61	190.61	0.00	-0.869
13:02:44.758	400.19	968.00	336.43	387.38	192.03	192.03	0.00	-0.868
13:02:44.778	400.06	981.62	341.46	392.75	194.06	194.06	0.00	-0.869
13:02:44.798	411.50	906.81	372.02	372.90	25.62	253.67	228.05	-0.998
13:02:44.818	411.41	909.19	373.33	373.88	20.26	251.27	231.01	-0.999
13:02:44.838	411.91	904.38	371.92	372.37	18.38	247.06	228.68	-0.999
13:02:44.858	412.28	898.75	370.26	370.45	11.90	241.44	229.54	-0.999
13:02:44.878	412.69	910.56	375.57	375.70	9.74	240.23	230.49	-1.000
13:02:44.898	412.75	920.56	379.76	379.88	9.57	240.34	230.77	-1.000
13:02:44.918	412.78	887.25	366.19	366.19	1.01	230.00	231.01	1.000
13:02:44.938	413.19	865.69	357.60	357.64	5.06	225.72	230.78	1.000

En la Tabla 2 se observa el *efecto inmediato* que la conexión del sistema de compensación a plena carga tiene en todos los parámetros de potencia de operación. Existe una mejoría significativa en todos los parámetros.

Tabla 3. Punto de conexión de sistema de compensación dinámica de Elspec.

Vp-L1 V	GEN I-L1 A	P-GEN-L1 kW	MainsS-L1 kVA	MainsQ-L1 kvar	GEN-Q kvar	PFCQ-L1 kvar	PF-L1
400.06	981.62	341.46	392.75	194.06	194.06	0.00	-0.869
411.50	906.81	372.02	372.90	25.62	253.67	228.05	-0.998
+2.7%	-7.6%	+8.95%	-5%	-87%	+30%	+100%	N/A

La Tabla 3 indica que mejorando el factor de potencia de operación desde un nivel no compensado de 0.87 en atraso (inductivo) hasta casi 1.0 (unidad), se obtiene un incremento en la potencia activa, kW, de un 8.95 %, lo cual, por supuesto, es debido parcialmente al incremento de un 2.7 % en el voltaje del secundario del transformador de la turbina, lo cual resulta en una disminución de las pérdidas de la carga.

El incremento en la generación de potencia debido al incremento del voltaje puede ser calculado por la siguiente expresión: $kW \times [V_1^2/V_2^2]$ y, teóricamente, la salida debería ser 361.27 kW, i.e., +5.8 %, con

el incremento en un 2.7 % del voltaje. El restante incremento del 3.15 %, i.e., 10.75 kW, tiene que ser por lo tanto un resultado directo del incremento de la eficiencia del generador.

Tal como lo expone la Tabla 3, el consumo de potencia reactiva del generador, GEN-Q, se incrementa en un 30 % cuando la potencia reactiva esta siendo suministrada por el sistema de Elspec, más que cuando la potencia reactiva estaba siendo tomada directamente de la red, a través del transformador de la turbina. Obviamente, un incremento en el consumo de potencia reactiva es indicativo de un incremento en la corriente de magnetización del generador, con lo que se incrementa la densidad de flujo, se mejora la inducción y subsecuentemente se produce el incremento en la potencia de salida del generador.

A niveles de generación más bajos, la inclusión de compensación resulta en un mayor incremento en la eficiencia en la medida en que el factor de potencia operativo del generador es mas bajo y el consumo de potencia reactiva es un porcentaje mucho más alto de la salida en kW generada por la turbina. Hemos tomado mediciones a otros tres niveles de carga: aproximadamente 5%, 15% y 25% y hemos repetido el ejercicio, i.e., hemos habilitando el sistema Elspec durante corridas normales: el resultado puede observarse en las siguientes Tablas 4, 5 y 6.

Tabla 4. Carga operacional a un 5%.

Tiempo	Vp-L1 V	GEN I -L1 A	MainsS-L1 kVA	Pm-L1 kW	GEN-Q kvar	MainsQ-L1 kvar	PFCQ-L1 kvar	Pf-L1
16:58:28.129	401.12	289.28	116.00	28.35	112.48	112.48	0.00	-0.244
16:58:28.150	406.91	105.00	41.28	33.76	143.02	23.75	119.27	-0.818
	+1.44%	-63.70%	-64.42%	+19.08%	+27.15%	-78.89%		

Table 5. Carga operacional a un 15%.

Tiempo	Vp-L1 V	GEN I -L1 A	MainsS-L1 kVA	Pm-L1 kW	GEN-Q kvar	MainsQ-L1 kvar	PFCQ-L1 kvar	Pf-L1
15:03:14.832	401.47	341.84	137.21	70.38	117.78	117.78	0.00	-0.513
15:03:14.853	407.94	205.70	82.40	79.69	147.59	20.97	126.62	-0.967
	+1.61%	-39.83%	-39.94%	+13.23%	+25.31%	-82.20%		

Table 6. Carga operacional a un 25%.

Tiempo	Vp-L1 V	GEN I -L1 A	MainsS-L1 kVA	Pm-L1 kW	GEN-Q kvar	MainsQ-L1 kvar	PFCQ-L1 kvar	Pf-L1
15:21:04.827	401.5	422.97	169.77	116.56	123.43	123.43	0.00	-0.687
15:21:04.848	407.56	317.03	128.79	123.99	154.82	34.82	120.00	-0.963
	+1.51%	-25.05%	-24.14%	+6.37%	+25.43%	-71.79%		

Tal como ocurrió con las mediciones previas, i.e. Tabla 2 y Tabla 3, existe un incremento en la potencia exportada, inmediatamente a continuación de haber sido habilitado el sistema de compensación de Elspec y, como antes, este incremento es, en parte, debido al incremento del voltaje. Si aplicamos el mismo procedimiento que antes, podemos calcular que la contribución porcentual al incremento de kW de la salida aportada por el incremento del voltaje es 2.31%, 3.25% y 3.04% respectivamente para las tablas 4, 5 y 6.

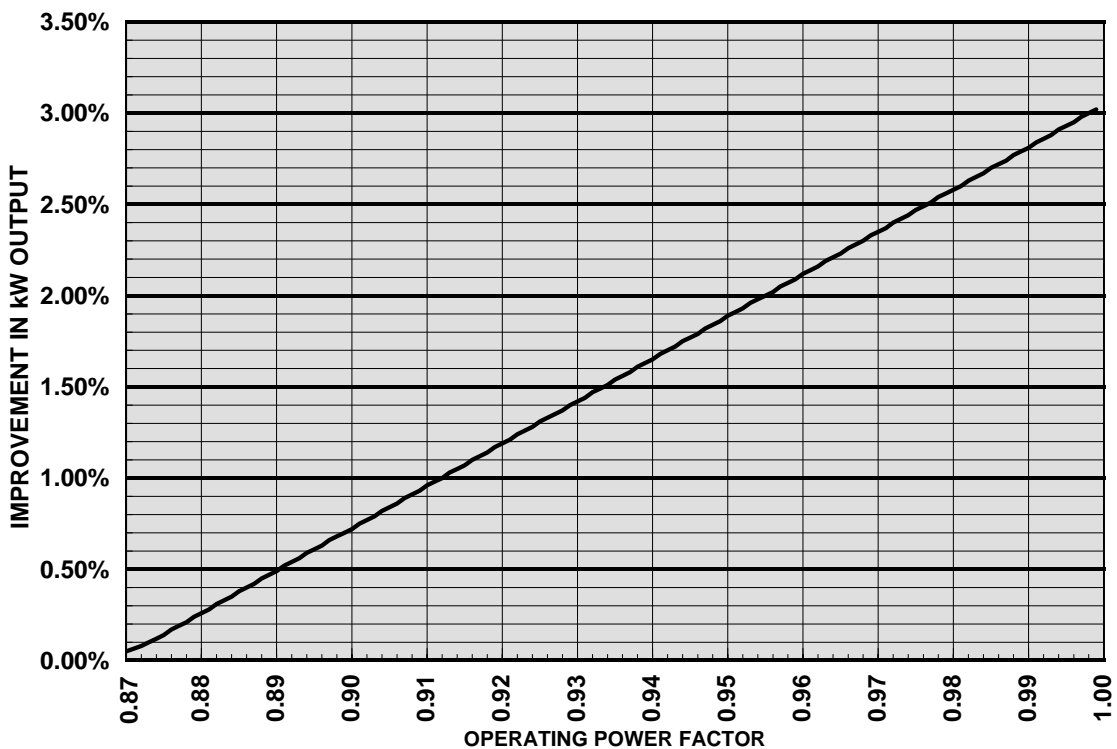
El consumo de potencia reactiva del generador, GEN-Q, se ha incrementado por un 27.15%, 25.31% y 25.43% en cada caso y el subsiguiente incremento en la potencia de salida, kW, excluyendo los efectos de las subidas de voltaje, es 16.1%, 10% y 3.33% respectivamente para por cientos de la carga del 5%, 15% y 25% respectivamente. I.e., por encima de un 30% de la carga, los niveles de mejoría, esto es, incremento en la salida en kW del generador, se encuentran en alrededor del 3%.

Los sistemas de compensación modernos, tales como el Equalizer de Elspec, incluyen una función de control de voltaje para mantener el voltaje de la fuente dentro de una banda de tolerancia conocida para prevenir voltajes altos o bajos en las líneas de transmisión y en la turbina. Esto es esencial debido a lo impredecible de las condiciones del viento y al comportamiento fluctuante de la demanda de potencia de los consumidores. Por ejemplo, operar un gran parque eólico durante condiciones pico del viento y consumo bajo de los consumidores resultaría en niveles de voltaje mas altos de los aceptables en las

líneas de transmisión; por otra parte, una generación baja de energía unida a una alta demanda del consumidor tendría el efecto opuesto: niveles de voltaje mas bajos a los permitidos o aceptados. En ambos escenarios, el sistema de Elspec actuaría para evitar cortes de energía: sub-compensaría para reducir el voltaje en el primer caso o sobre-compensaría para incrementar el voltaje en el segundo. Esto evita la necesidad de cortes de energía durante los puntos tanto de baja como de alta demanda del consumidor. Tomando esto en consideración, el incremento efectivo en la salida debido al incremento del voltaje por encima del nominal, no puede ser tomado en cuenta cuando se esta evaluando un posible mejoramiento de la eficiencia de la producción de potencia: un voltaje estable debe ser asumido siempre.

Con esta información es posible, para propósitos de estimación, generar un gráfico que permita predecir el % de incremento de la salida del generador, en kW, en función de los valores del factor de potencia operativo del WTG, excluyendo la influencia del voltaje.

Gráfico 1: Mejoramiento de la salida del WTG, en % de kW, excluyendo los efectos del incremento de voltaje



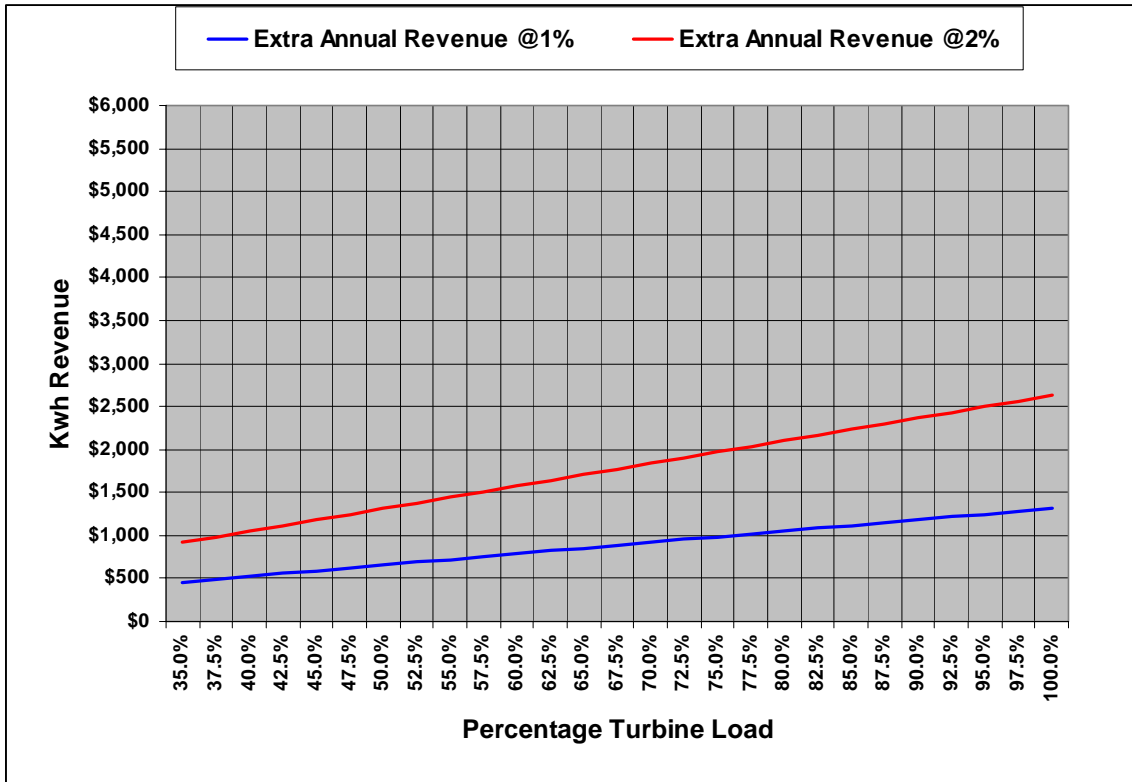
De esta manera, existe un incremento lineal en los valores de salida en kW del WTG como resultado directo de la operación del generador a niveles de factor de potencia más altos.

Por supuesto, el Gráfico 1 anterior esta fundamentado en una comparación entre un WTG sin compensación y compensado a plena carga: en la práctica, la mayoría de los WTG inductivos son suministrados con sistemas de compensación convencional sin carga los cuales pueden mantener el factor de potencia entre los valores de 0.96 ~ 0.97 hasta un 35% de carga de la turbina: en la práctica, la mayoría de las turbinas de viento inductivas son suministradas con sistemas de compensación convencional no carga los cuales pueden mantener el factor de potencia entre el 0.96 ~ 0.97 hasta el 35% de la carga del WTG, por lo que cualquier incremento esperado en la salida puede solo ocurrir cuando el WTG esta operando en el rango del 35% ~ 125% de la carga, lo cual resultaría en un mejoramiento (incremento) anual de alrededor del 1% ~ 2% de la salida en kW del WTG, dependiendo, por supuesto, de las condiciones totales anuales del viento.

A pesar de que un 1% o un 2% de mejora (incremento) de la salida en kW del WTG pareciera ser insignificante, la mayoría de las instalaciones eólicas operan a un muy bajo margen de utilidad, de solo un 1% o un 2%: por lo tanto, aún ese aparentemente insignificante mejoramiento en el comportamiento puede representar un incremento de un 100% de las utilidades.

El Gráfico 2 ofrece una indicación del posible incremento en ganancias basado en un incremento del 1% y del 2% en el comportamiento del WTG. El gráfico esta basado en una instalación de 20 WTG, dimensionados a 1.5MW, usando un precio de venta del kWh igual a \$0.05.

Gráfico 2.



Reclamo: – Tanto los datos como la información contenidos en este documento son solamente para propósitos de guía e información y están referidos a un parque eólico específico. Elspec, ElspecNA ni el autor ni cualquier otra compañía o empleado asociados, afirma que los mismos resultados pueden esperarse o alcanzarse en cada parque eólico instalado o por instalar.

Disclaimer:- The data and information contained in this document is for information and guideline purposes only and relates to a specific wind turbine installation. Elspec, the author, nor any associated company or employee does not claim that the same results can be expected or achieved at every wind turbine installation.