

基于单周控制的逆变器并网研究

将单周控制技术应用到IST-ZSI并网发电系统中,分析了系统的技术原理、组成结构及控制策略,最终在开关周期内利用单周控制原理对每个开关管实现准确控制。系统电路结构简单、控制准确度高、鲁棒性强且动态响应快。在理论分析的基础上,对系统进行了并网仿真分析,验证了拓扑结构的正确性和控制策略的优越性。

齐彩娟¹ 齐新杰² 田 星¹ 张晓晨¹ 赵 亮¹ / 1. 国网宁夏电力公司经济技术研究院 2. 宁夏电力建设工程公司

0 引言

全球能源供应的日趋紧张,使新能源发电^[1-4]技术引起了人们的关注,并网逆变器作为新能源发电的关键设备成为了国内外学者的研究热点之一。研究新型拓扑结构与并网控制策略,提高输出电能的质量及效率成为近年来的研究重点。

文献[4]提出一种基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的大型光伏并网系统,该系统满足了对光伏逆变器单体容量大、电压等级高的要求,但所需器件数目较多,带来结构复杂、成本高和体积大等一系列问题;文献[5]针对光伏并网系统提出了基于扰动观察法的改进MPPT算法,提高了光伏并网发电的转换效率,但没有考虑局部阴影问题,当出现局部阴影或局部损坏时,其输出特性会发生很大变化,不稳定性较大;文献[6]提出一种新型的并网电流双环控制策略,以电容电流为内环反馈,以并网电流为外环反馈,采用模糊PR+重复控制在线调节系统干扰的影响,实现系统高电能质量并

网,但不足之处在于控制算法复杂且仅适于单相系统,并不能在三相并网中应用。

尽管以上研究方案在一定程度上都提高了并网逆变器输出电能的质量,但均未建立一个集电路结构简单、响应速度快且控制准确度高为一体的并网发电系统。为此,本文提出一种直通物理分离型Z源逆变器(Isolated Shoot-Through Z-Source Inverters, IST-ZSI)^[7]并网发电系统,该系统不仅结合了单周控制(One-Cycle Control, OCC)技术^[8-10]结构简单、控制逻辑清晰且响应速度快的特点以及IST-ZSI升压能力强的优点,和其他传统并网系统相比还具有下述特点。

1) IST-ZSI系统将直通占空比的控制从物理结构分离出来,和传统Z源逆变器相比,相同直通占空比下,变换器能够输出更高幅值的交流电压。

2) 单周控制的IST-ZSI并网发电系统和传统的PI双闭环并网控制相比,并网电流谐波畸变率更小,并网波形质量更好。

3) 该系统起动冲击小,鲁棒性能好。

1 IST-ZSI单周控制原理

1.1 IST-ZSI拓扑结构

电路结构如图1所示。该拓扑的独特之处在于将升压因子和调制因子解耦,使直通占空比在物理上相互独立。

该拓扑下的直流母线电压及阻抗网络的电容电压^[7]分别如式(1)和式(2)所示



齐彩娟/助理工程师

关键词/Keywords

单周控制·
并网发电·
变换器·
仿真·

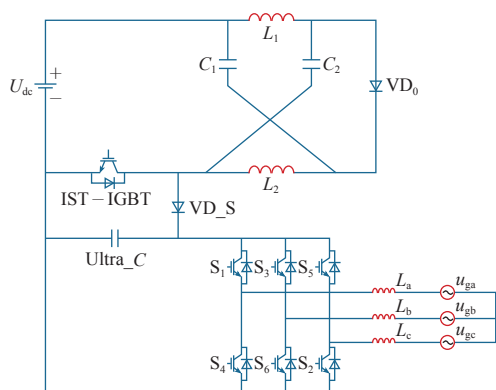


图1 IST-ZSI拓扑结构

$$U_o = \frac{1}{1-2D} U_{dc} \quad (1)$$

$$U_c = \frac{D}{1-2D} U_{dc} \quad (2)$$

IST-ZSI实现了升压因子 B 和调制因子 M 的解耦，使得 B 能够宽范围调节，得到较高的电压传输比。

1.2 基本原理

若不考虑IST-ZSI阻抗网络，仅对三相桥式逆变器进行分析，如图2所示。

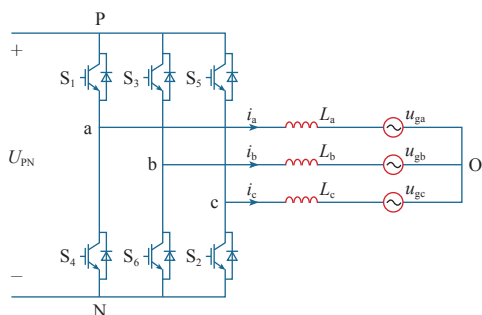


图2 三相桥式逆变电路

假设各滤波电感值相同，则各相瞬时电压为

$$\begin{cases} u_{aO} = u_{ga} + j\omega Li_a \\ u_{bO} = u_{gb} + j\omega Li_b \\ u_{cO} = u_{gc} + j\omega Li_c \end{cases} \quad (3)$$

由于滤波电感的阻值小，流过的电压降与三相电压 u_{ga} 、 u_{gb} 和 u_{gc} 相比可忽略不计，即

$$\begin{cases} u_{aO} = u_{aN} - u_{ON} \approx u_{ga} = U_g \sin \omega t \\ u_{bO} = u_{bN} - u_{ON} \approx u_{gb} = U_g \sin (\omega t - 120^\circ) \\ u_{cO} = u_{cN} - u_{ON} \approx u_{gc} = U_g \sin (\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

根据三相电压的对称性，并结合式（4）可得

$$\begin{cases} u_{aO} = u_{aN} - \frac{1}{3}(u_{aN} + u_{bN} + u_{cN}) \\ u_{bO} = u_{bN} - \frac{1}{3}(u_{aN} + u_{bN} + u_{cN}) \\ u_{cO} = u_{cN} - \frac{1}{3}(u_{aN} + u_{bN} + u_{cN}) \end{cases} \quad (5)$$

现定义二值开关函数 S_k ，代表图2中六个开关管的导通关断状态，令上桥臂导通，下桥臂关断为1，反之为0，即

$$S_k = \begin{cases} 1 & k = a, b, c \\ 0 & \end{cases} \quad (6)$$

联立式（5）和式（6）可得

$$u_{kO} = U_{PN} S_k - \frac{U_{PN}}{3} \sum_{i=a,b,c} S_i \quad k = a, b, c \quad (7)$$

根据式（7）可以列出不同状态下的开关组合，如表1所示。

表1 开关组合

S_a	S_b	S_c	u_{aO}	u_{bO}	u_{cO}	开关组合
0	0	0	0	0	0	零矢量
0	0	1	$-\frac{1}{3}U_{PN}$	$-\frac{1}{3}U_{PN}$	$\frac{2}{3}U_{PN}$	非零矢量
0	1	0	$-\frac{1}{3}U_{PN}$	$\frac{2}{3}U_{PN}$	$-\frac{1}{3}U_{PN}$	非零矢量
0	1	1	$-\frac{2}{3}U_{PN}$	$\frac{1}{3}U_{PN}$	$\frac{1}{3}U_{PN}$	非零矢量
1	0	0	$\frac{2}{3}U_{PN}$	$-\frac{1}{3}U_{PN}$	$-\frac{1}{3}U_{PN}$	非零矢量
1	0	1	$\frac{1}{3}U_{PN}$	$-\frac{2}{3}U_{PN}$	$\frac{1}{3}U_{PN}$	非零矢量
1	1	0	$\frac{1}{3}U_{PN}$	$\frac{1}{3}U_{PN}$	$-\frac{2}{3}U_{PN}$	非零矢量
1	1	1	0	0	0	零矢量

从表1可以看出，若要IST-ZSI在非直通状态下有效跟踪电流，需满足以下两个条件：①每个开关周期开始不能出现传统零矢量；②需满足 $|u_{kO}| > E_m$ 或 $|U_{PN}| > 3E_m$ 。其中，对于条件②，考虑到直流侧电压太高时，不仅对开关管的耐压性不利，还使开关损耗增大，因此取 $|U_{PN}| > 3E_m/\sqrt{2}^{[11]}$ 。

2 单周控制的IST-ZSI发电系统

图3为单周控制下IST-ZSI并网发电系统，此系统由单周模块控制的电流回路和直流母线电压控制的电压回路组成。其中电流控制回路的主要

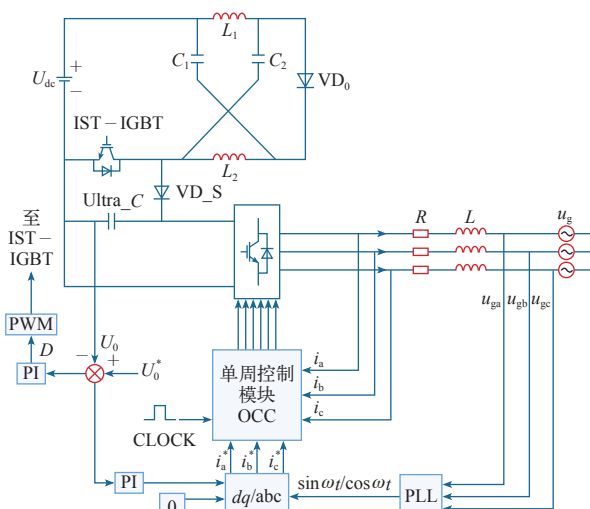


图3 单周控制下的并网发电系统图

目的是使系统实现单位功率因数并网，电压控制回路主要稳定直流母线电压。

非直通状态下，单周控制下的系统方程^[12]如式(8)所示

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_k dt = (K_p + K_i \int dt)(i_{kref} - i_k) \quad k = a, b, c \quad (8)$$

式中， i_{kref} 为k相电流的参考值。

为加快响应速度，将电流环中的比例-积分调节简化为比例调节，则有

$$\frac{1}{T} \int_0^T i_k dt = K_p(i_{kref} - i_k) \quad k = a, b, c \quad (9)$$

因为a、b和c三相电路对称，下面以a相为例，建立如图4所示的OCC结构图。

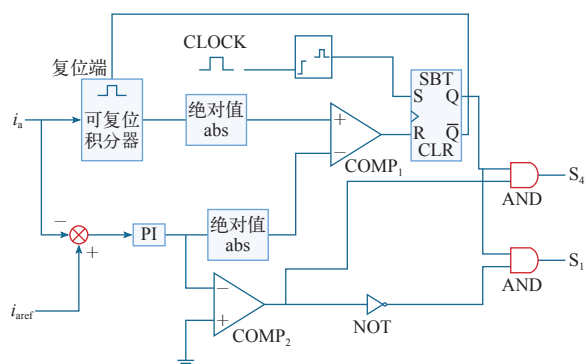


图4 a相OCC结构图

假设RS触发器初始值 $Q=1$ ， $\bar{Q}=0$ 。

$i_{aref} - i_a > 0$ 时，经PI调节器，比较器COMP₂输

出0，此时 $S_4=0$ ， $S_1=1$ ，即a相上桥臂导通， i_a 增大。随着 i_a 增大，当与 $K_p(i_{aref} - i_a)$ 的绝对值比较满足一定条件时，比较器COMP₁输出1，触发器动作： $Q=0$ ， $\bar{Q}=1$ ，复位端动作，a相上下桥臂同时截止， $S_4=0$ ， $S_1=0$ 。

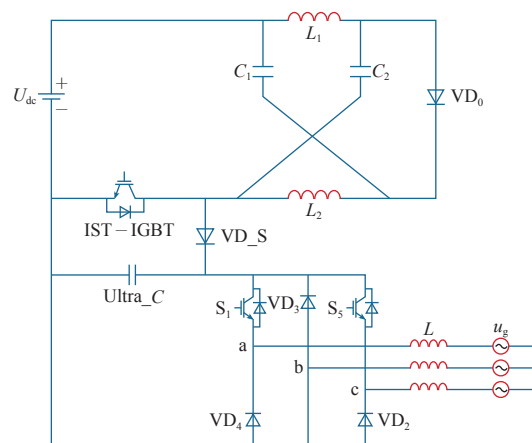
同理， $i_{aref} - i_a < 0$ 时，比较器COMP₂输出0， $S_4=1$ ， $S_1=0$ ，a相下桥臂导通，满足一定条件后可复位积分器复位： $S_4=0$ ， $S_1=0$ 。

b、c相单周控制结构图同a相，这里不再赘述。

简言之，IST-ZSI并网发电系统以单周控制模块控制下的 i_a 、 i_b 和 i_c 三相电流控制为内环，以直流母线电压控制为外环的双闭环控制方案，最终实现三相电路的并网控制。

3 系统控制策略

非直通状态下，IST-ZSI将整个工作周期分为 $[0^\circ \sim 60^\circ]$ 、 $[60^\circ \sim 120^\circ]$ 、 $[120^\circ \sim 180^\circ]$ 、 $[180^\circ \sim 240^\circ]$ 、 $[240^\circ \sim 300^\circ]$ 和 $[300^\circ \sim 360^\circ]$ 六个区间，图5为 $[0^\circ \sim 60^\circ]$ 区间电路状态图。

图5 $[0^\circ \sim 60^\circ]$ 区间IST-ZSI电路图

如图5所示的 $[0^\circ \sim 60^\circ]$ 区间内， $i_a \geq 0$ ， $i_b \leq 0$ ， $i_c \geq 0$ ，即 S_6 一直导通， S_3 、 S_4 和 S_2 通过并联二极管导通。该区间中4个开关管的状态已固定不变，只需控制 S_1 和 S_5 ，使a、c两相电流实现单位功率因数并网要求。

当a、c两相满足并网要求时，根据电路对称性，b相也能满足要求，因此两相电流满足要求时，另一相也能随指令变化。若该区间内只有 i_b 一

相电流能有效跟踪电流时, 因为 i_b 的极性与 i_a 、 i_c 不同, 由式(9)可知, 当b相电路的偏差为 e 时, a、c两相偏差的总和为 $-e$, 且任何一相偏差均小于 $|e|$, 因此也可以有效跟踪电流指令变化。

其他另外5个区间工作原理类似。

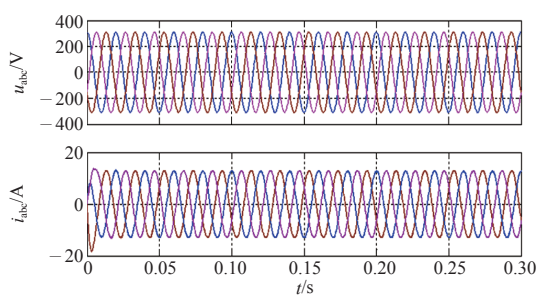
4 仿真分析

为验证理论分析的正确性, 对单周控制下的IST-ZSI并网系统进行仿真分析, 具体仿真参数如表2所示。

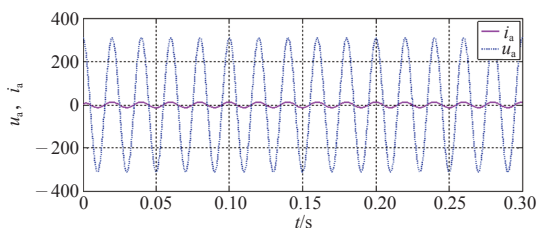
表2 仿真参数

参数	数值	参数	数值
U_{dc}/V	480	L/mH	5
$L_1=L_2/mH$	19.2	R/Ω	8
$C_1=C_2/\mu F$	700	f_s/kHz	20
U_o^*/V	800	U_g/V	220
Ultra_C/ μF	2 500	D	0.2

将并网功率设为6 kW时, 并网电压、电流的波形图如图6所示。从图6a可以看出并网电流启动瞬间有微小波动, 随后迅速恢复稳定, 起动电流冲击较小; 图6b为以a相为例电压、电流的波形图, 可以看出, 单周控制策略下, 使并网电流与电网电压完全同频率、同相位, 满足了单位功率因数并网要求。



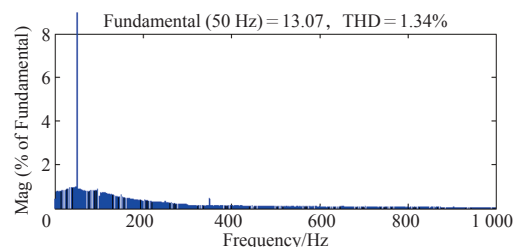
(a) 三相并网电压、电流



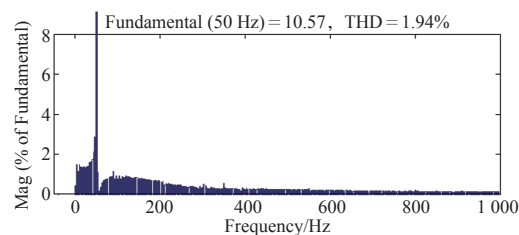
(b) a相电压、电流波形

图6 并网仿真波形

将IST-ZSI并网发电系统分别采用单周控制 and 传统PI双闭环控制策略进行仿真, 并对并网电流进行傅里叶分解, 仿真波形如图7所示。图7a为单周控制下的电流频谱图, 谐波畸变率为1.34%, 图7b为PI并网控制策略下的电流频谱图, 谐波畸变率为1.94%, 单周控制下的电流谐波畸变率与传统PI双闭环的相比降低了0.6%, 说明单周控制策略的IST-ZSI并网系统控制准确度更高、波形质量更好。



(a) 单周控制



(b) 传统PI控制

图7 不同控制策略下的并网电流频谱

单周控制下的IST-ZSI并网发电系统的直流母线电压及阻抗网络电容电压如图8所示, 直流母线电压及阻抗网络电容电压分别在800 V和160 V左右波动, 与式(1)和式(2)理论值相符, 证明了IST-ZSI并网发电系统的正确性。此外图8可以看出二者波形仅在起动初期有微小波动, 短短0.02 s后就能恢复稳定, 说明系统超调及起动冲击小。

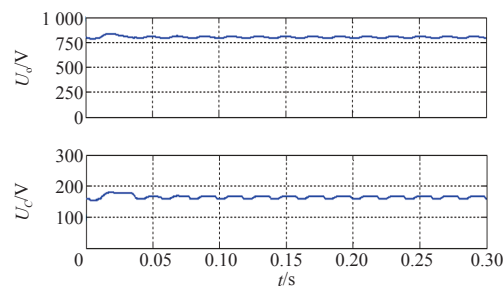


图8 直流母线电压和电容电压波形

如图9所示, 0.15 s时直流侧输入电压由480 V降到420 V, IST-ZSI并网发电系统的输出波形图。图9中能看出直流母线电压在0.15 s电压跌落的瞬间有个微小波动, 但瞬间又恢复到800 V, 而直流侧输入电压的变化对三相并网电流几乎并没任何影响, 说明并网系统鲁棒性能好, 可以适用于电源波动较大的场合。

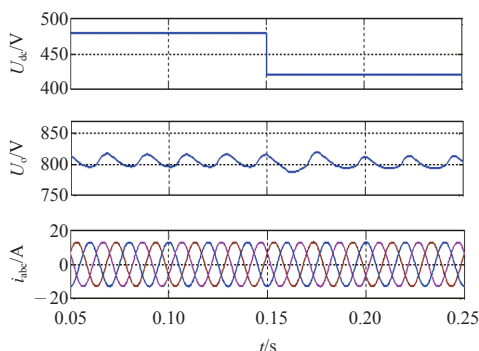


图9 电压突降时的输出波形

5 结束语

本文将单周控制技术应用到IST-ZSI并网发电系统中, 在开关周期内运用非线性的方式在输出信号和开关信号间建立了线性关系, 最终达到对每个开关管的准确控制。理论分析的基础上进行了Matlab/Simulink仿真分析, 结果表明, 该系统并网电流谐波畸变率小、鲁棒性能高, 在工程上具有一定的使用价值。

参考文献

- [1] 张磊, 朱凌志, 陈宁, 等. 新能源发电模型统一化研究 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (24): 129-138.
- [2] Ma Yiwei, Yang Ping, Guo Hongxia. Distributed generation system development based on various renewable energy resources [C]. Yantai: Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, 2011: 6203-6207.
- [3] Gajanayake Chandana Jayampathi, Vilathgamuwa, Mahinda D, et al. Z-Source-Inverter based flexible distributed generation system solution for grid power quality improvement [J]. IEEE Transactions on Energy conversion, 2009, 24 (3): 695-705.
- [4] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (36): 27-33.
- [5] Riad Kadri, Jean-Paul Gaubert, Gerard Champenois. An improved maximum power point tracking for photovoltaic grid-connected inverter based on voltage-oriented control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (1): 66-75.
- [6] 杨旭红, 王创典, 何超杰, 等. 单相LCL并网逆变器新型电流控制策略研究 [J]. 电气传动, 2016, 46 (12): 47-51.
- [7] 张华强, 齐彩娟, 姚统. 直通物理分离型Z源逆变器并网 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34 (7): 1-8.
- [8] 徐友, 郑建勇, 梅军, 等. 基于单周控制的三相PWM整流器负序电压补偿型不平衡控制策略 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (11): 183-190.
- [9] 巫旺, 王涛, 牛明哲, 等. 电流-单周控制Buck变换器设计 [J]. 电力电子技术, 2016, 50 (7): 8-10.
- [10] Gao Chao. A new high-performance AC/DC power factor correction switching converter based on one-cycle control technology and active floating-charge technology [J]. Journal of Chongqing University (English Edition), 2008, 7 (2): 119-124.
- [11] 张崇巍, 张兴. PWM整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 23-30.
- [12] Chen G, Chen Y, Smedley K M. Three-phase four-leg active power quality conditioner without references calculation [C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004, 1: 587-593.

(收稿日期: 2017-02-06) **EA**